

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení vlhkosti na mezi smrštění v laboratorních
podmínkách

Determination of Shrinkage Limit

Student:

Markéta Borská

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Markéta Borská**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: Stanovení vlhkosti na mezi smrštění v laboratorních podmínkách
Determination of Shrinkage Limit
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracování:

Teoretický úvod do problematiky konzistenčních mezí s důrazem na vlhkost na mezi smrštění
Stanovení vlhkosti na mezi smrštění pro zeminy s různým poměrem jemné frakce
Stanovení křivky smrštění
Vyhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

Literatura:

BS 1377-2:1990, *Methods of test for Soils for civil engineering purposes: Part 2: Classification tests*, 1990. 1. London.

HEAD, K. H., 2006. *Manual of soil laboratory testing*. Third edition. Dunbeath: Whittles Publishing. ISBN 19-044-4536-5.

ŠIMEK, Jiří, 1990. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00428-4.

GAPAK, Yagom et al., 2017. *Laboratory determination of volumetric shrinkage behavior of bentonites: A critical appraisal*. Applied Clay Science. 135, 554-566. ISSN 01691317.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2018

Datum odevzdání: 06.05.2019

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.“

V Ostravě, dne 2. května 2019

Markéta Borská

Prohlašuji:

- Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užití své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 2. 5. 2019

Anotace

BORSKÁ, Markéta. *Stanovení vlhkosti na mezi smrštění v laboratorních podmínkách*. Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2019. 58 stran.

Tato bakalářská práce se zabývá stanovením vlhkosti na mezi smrštění zemin. Smršťování zemin je proces, při kterém zemina vlivem odpařování vody zmenšuje svůj objem a tím může vyvolávat značné problémy na stavbách, v jejichž podloží se tyto objemově nestálé zeminy nacházejí. Tyto objemové změny se projevují především u jemnozrnných, soudržných zemin. V běžné praxi určujeme čtyři základní konzistenční stavy, na jejichž hranicích definujeme tzv. Atterbergovy meze. Mezi tyto meze patří také mez smrštění, která je předmětem zkoumání této bakalářské práce. Tato práce je rozdělená na dvě roviny: na rovinu teoretickou a praktickou, kde jsou vyhodnocené prováděné laboratorní zkoušky, pomocí kterých jsem stanovila základní parametry zemin.

Klíčová slova: Mez smrštění, zemina, vlhkost, mez tekutosti, mez plasticity

Annotation

BORSKÁ, Markéta. *Determination of Shrinkage Limit*. Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2019. 58 p.

This bachelor thesis deals with the determination of the shrinkage limit. Soil shrinkage is a process in which the soil reduces its volume due to water evaporation and can cause considerable problems for the subsoil structures in which these voluminous earths are found. These volumetric changes occur mainly in fine-grained, cohesive soils. In common practice, we determine five basic consistency states, at whose borders we define the so-called Atterberg limits. These limits also include the limit of shrinkage, which is the subject of this bachelor thesis. This thesis is divided into two levels: the theoretical and practical level, where the laboratory tests are evaluated, by which I have determined the basic parameters of the soil.

Key words: Shrinkage Limit, soil, moisture, Liquid limit, Plastic Limit

Obsah

1. Úvod	9
2. Vznik zemin a jejich charakteristika	11
3. Vlhkost zemin.....	12
4. Konzistenční stavy, konzistenční meze	13
4.1 Mez tekutosti.....	16
4.2 Mez plasticity.....	18
4.3 Index plasticity I_p	19
4.4 Mez smrštění a křivka smrštění.....	19
4.6 Potenciál smrštění zemin	25
4.7 Potencionál bobtnání zemin.....	25
4.8 Využití parametru vlhkosti na mezi smrštění.....	26
5. Laboratorní měření	29
5.1 Popis vzorků.....	29
5.2 Stanovení zrnitosti zemin	32
5.3 Stanovení vlhkosti zeminy v přirozeném uložení	35
5.4 Stanovení měrné hmotnosti pevných částic	36
5.5 Stanovení vlhkosti na mezi tekutosti a plasticity	37
5.6 Stanovení vlhkosti na mezi smrštění	37
5.7 Stanovení křivky smrštění.....	38
5.8 Vyhodnocení zkoušek na vzorku M.....	40
5.9 Vyhodnocení zkoušek na vzorku FM	43
5.10 Vyhodnocení zkoušek na vzorku SČ	46
6. Závěr.....	49
7. Seznam literatury.....	53
8. Seznam použitých norem	56
9. Seznam obrázků	57
10. Seznam tabulek a grafů	58

Seznam zkratk a proměnných

H	- suma naměřených vzdáleností při kalibraci hustoměru (mm)
h	- vzdálenost od hrotu ke krku baňky hustoměru (mm)
Hr	- efektivní hloubka hustoměru (mm)
I_C	- index konzistence
I_L	- index tekutosti
I_P	- index plasticity (%)
I_S	- index smrštění
L	- vzdálenost od značky 100 ml po značku 1000 ml na odměrném válci (mm)
m_d	- hmotnost vzorku zeminy po vysušení (g)
m_{VZ}	- hmotnost zkušebního vzorku (g)
m_w	- hmotnost vody ve vzorku (g)
R_s	- číslo smrštění
Sr	- stupeň nasycení (%,-)
s_u	- neodvodněná smyková pevnost (kPa)
s_v	- poměrné objemové smrštění (%)
V_d	- objem suché zeminy (cm ³)
V_p	- objem pórů (cm ³)
V_{pmi}	- objem pórů (cm ³)
V_s	- objemové smrštění (cm ³)
V_w	- objem vody (cm ³)
V_I	- počáteční objem vzorku (cm ³)
w	- vlhkost (%)

- w_L - vlhkost na mezi tekutosti (%)
- w_P - vlhkost na mezi plasticity (%)
- w_S - vlhkost na mezi smrštění (%)
- w_M - vlhkost v bodě M na křivce smrštění (%)
- w_N - vlhkost v bodě N na křivce smrštění (%)
- ρ - objemová hmotnost zeminy v přirozeném uložení (kg/m^3)
- ρ_d - objemová hmotnost suché zeminy (kg/m^3)
- ρ_s - měrná hmotnost (kg/m^3)
- ρ_w - objemová hmotnost vody (kg/m^3)

1. Úvod

Vlhkost na mezi smrštění w_s , vlhkost na mezi plasticity w_p a vlhkost na mezi tekutosti w_L jsou tři základní konzistenční meze soudržných zemin. Laboratorním stanovením vlhkosti na mezi tekutosti a vlhkosti na mezi plasticity a jejich porovnáním s konkrétní vlhkostí zeminy lze určit, v jakém konzistenčním stavu se zemina nachází. Konzistence zemin, která je závislá na množství vody v zemině, předurčuje pevnostní a přetvárné vlastnosti soudržných zemin a je důležitou charakteristikou všech soudržných zemin.

Laboratorní stanovení vlhkosti na mezi tekutosti a mezi plasticity spolu se zrnitostním rozbořem patří mezi základní zkoušky, které se vždy provádějí v laboratořích mechaniky zemin na vzorcích soudržných zemin. S pomocí výsledků těchto analýz lze zeminu klasifikovat a pomocí korelačních vztahů určit další charakteristiky nezbytné pro návrh geotechnických konstrukcí, jako je propustnost zemin, parametry související se stlačitelností, pevností, překonsolidací apod. [1, 2, 3].

Laboratorní stanovení vlhkosti na mezi smrštění, které je předmětem této bakalářské práce, se standardně v laboratořích neprovádí. Touto zkouškou se stanovuje vlhkost, po jejímž dosažení zemina již dále nezmenšuje svůj objem [4].

Pro správné pochopení celé problematiky je třeba si definovat rozdíl mezi základními pojmy, kterými jsou hornina, horninový masiv a zemina, resp. zemina soudržná. Pojmy související s konzistenčními mezemi a stavy jsou vysvětleny v následujících kapitolách. Pojmy hornina, horninový masiv a zemina nám definuje norma ČSN EN ISO 14688-1 (duben 2018), norma ČSN EN ISO 14689-1 (duben 2018). Jejich definice zní:

Horniny jsou přírodní minerální asociace různého složení a struktury, vzniklé působením geologických procesů, které mají podobu horninového tělesa.

Zemina je agregát minerálů nebo organického materiálu, který lze ručně rozdělit ve vodě.

Horninový masiv je horninové těleso, prostoupené plochami nespojitosti. Podle povahy horninového materiálu lze rozlišit skalní horninový masiv a zemní horninový masiv.

Obecně je zemina prostředím tvořené skupinou pevných zrn, mezi kterými působí síly, a volné prostory mezi těmito zrny jsou vyplněny vodou, plynem nebo obojím. Vazby mezi zrny zemin jsou mnohonásobně menší než vazby u skalních hornin. Skalní horninový masiv se skládá z horninových bloků, na jejichž hranici vznikají plochy nespojitosti.

Vazby mezi jednotlivými bloky hornin mohou být daleko pevnější než vazby mezi zrny zemin. Právě kvůli rozdílnému prostředí zeminy a horniny, reagují tato prostředí na stejná zatížení odlišným způsobem. [2]

Zemina se obvykle přetváří vzájemným posunem zrn, to znamená, že se souvisle přetváří jako celá hmota. Může docházet k otáčení zrn, méně často pak k přetváření vlastních zrn. Přetváření horninového masivu vzniká v oblasti ploch nespojitosti. Dochází zde především k posunu bloků. [2]

V pórech zemin působí všesměrný tlak vody, naopak u skalního masivu se jedná pouze o usměrněný tlak vody kolmý na danou plochu nespojitosti. Plochy nespojitosti také určují propustnost horninového masivu. Voda proudí pouze směry určenými průběžností ploch nespojitosti. [2]

Soudržné zeminy (Obrázek 1) jsou takové zeminy, mezi jejichž pevnými částicemi existují silové vazby. Jsou to směsi převážně jílovitých a hlinitých zrn. Hlavní indexovou charakteristikou soudržných zemin je jejich konzistence. Konzistenční stav se vyjadřuje pomocí indexu konzistence I_c .



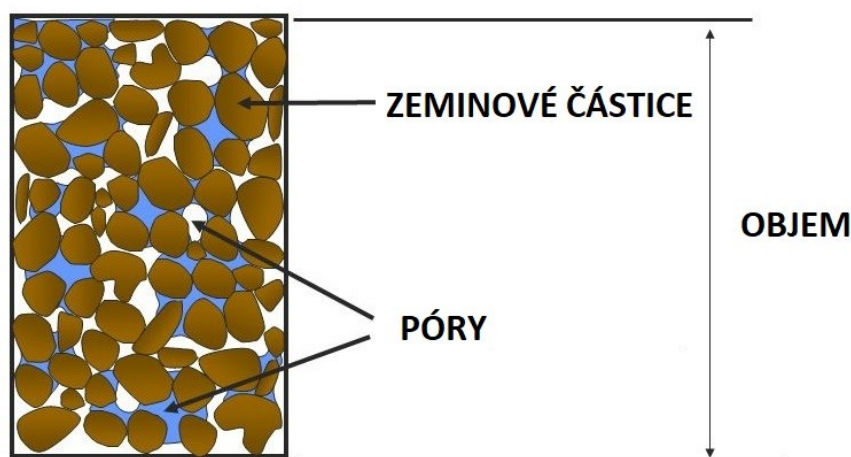
Obrázek 1: Jílovitá zemina v přirozeném stavu (zdroj autor)

2. Vznik zemin a jejich charakteristika

V důsledku geologických procesů, kterými jsou zvětrávání, transport a sedimentace, vznikají z vyvřelých, hlubinných i sedimentárních skalních hornin zeminy. V inženýrské praxi nazýváme zeminami více či méně stejnorodé usazeniny, které vznikly mechanickým zvětráváním v důsledku atmosférických jevů, jako jsou střídání vysokých a nízkých teplot, prosakující podzemní vody či činností povrchové vody, působením ledu a větru. Na rozrušování hornin má vliv velké množství fyzikálních a chemických procesů vedoucích k dezintegraci (rozpadu) a dekompozici (rozkladu) hornin na úlomky různých velikostí nebo až na jednotlivá zrna. Vznikají tak balvany, kameny, valouny, šterky, písky, prachy, hlíny a jíly. Chemické či biologické procesy zapříčiňují komplexní změny fyzikálních i chemických vlastností. [1]

Rozlišujeme dvě základní skupiny zemin z hlediska jejich vzniku. První skupinou jsou zeminy reziduální. Tyto zeminy vznikly zvětráváním svrchní vrstvy zemské kůry. Zeminy reziduální zůstávají na místě svého vzniku, nedochází tak k jejich transportu. V geologii se rovněž můžeme setkat s termínem eluviální zeminy, což je nepřemístěná zvětralina plynule přecházející do matečné horniny v podloží [6]. Druhou skupinou jsou zeminy sedimentární, které rovněž vznikly zvětráváním skalních hornin, avšak dále byly transportovány obvykle do nižších poloh, kde postupem času sedimentovaly. Transport částic závisí na jejich velikosti, způsobu přemísťování a na rychlosti přenosového média. Zeminy sedimentární dále rozlišujeme na sedimenty aluviální (naplavené), deluviální (svahové), eolické (váté), glaciální (ledovcové), mořské usazeniny, antropogenní atd. Nejsložitější úložné poměry pak existují většinou u aluviálních sedimentů, jejichž velikost zrn zahrnuje zrna šterkovité až jílovité frakce. [7]

Z fyzikálního hlediska jsou zeminy tvořeny pevnými minerálními zrny různých tvarů a velikostí, mezi nimiž jsou póry částečně vyplněné plyny a vodou (Obrázek 2). Přítomnosti silových vazeb mezi pevnými částicemi rozlišujeme zeminy soudržné a nesoudržné, resp. sypké. V nasycené zemině jsou póry zcela zaplněny vodou; v suché zemině obsahují pouze plyny. Interakce mezi strukturou zeminy a stavem pórů má zásadní vliv na chování půdní hmoty, zejména jejich vlastností v čase. Z těchto důvodů jsou zeminy považovány za velice složité látky. [7]



Obrázek 2: Schéma partikulární povahy částečně saturované zeminy

Složitost a samotná proměnlivost skladby a vlastností zemin nás vede k určování jejich popisných a fyzikálních parametrů, které stanovujeme pomocí laboratorních či polních zkoušek. Pro úspěšný geotechnický zásah do přírodního prostředí je tedy nutné provádět studium druhu a složení zemin, geologických a hydrogeologických poměrů území a historie napětí. [8]

3. Vlhkost zemin

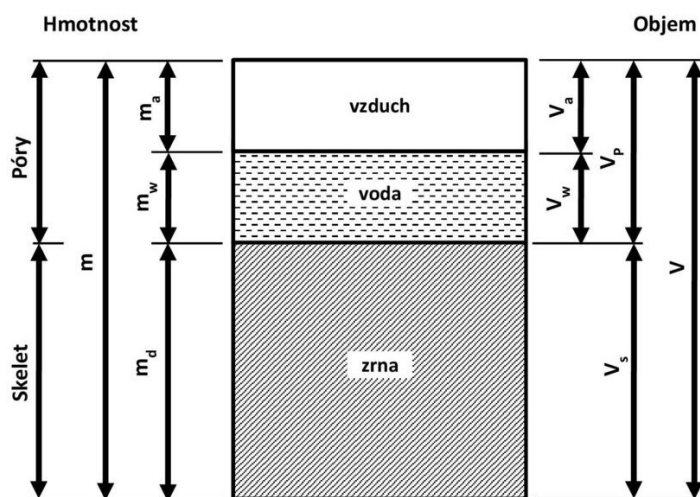
Zemina je z fyzikální podstaty velice složitou látkou, která se od ostatních látek liší především tím, že zahrnuje tři fáze – pevnou, kapalnou, plynnou, přičemž množství kapalně a plynné fáze se v čase mění. Vzájemný vztah a poměr těchto fází značně ovlivňuje chování dané zeminy jako celku (Obrázek 3).

Množství vody obsažené v zemině značným způsobem ovlivňuje její vlastnosti, především chování zeminy při zatížení. U jílovitých zemin je základní popisnou a fyzikální vlastností, jelikož jílovitá zemina obsahuje menší množství vody má lepší pevnostní parametry a výrazně menší stlačitelnost než zemina, která má vyšší vlhkost [8]. Měření vlhkostí zemin ve velké míře pomáhá při klasifikaci soudržných zemin [4].

Ve svém přirozeném prostředí zemina téměř vždy obsahuje vodu, která je součástí její struktury. Vlhkost zeminy v přirozeném uložení w je definována jako poměr hmotnosti vody m_w k hmotnosti suchých zrn zeminy m_d : [8]

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 [\%] \quad (1)$$

Vlhkost v zemině určujeme dle normy ČSN EN ISO 17892-1 jako množství vody v prostoru mezi zrny, která lze odstranit sušením v sušičce při teplotě 110°C po dobu 12 až 24 hodin. Minimální množství vzorku zeminy potřebné pro stanovení vlhkosti závisí na její zrnitosti. U zemin, které mají všechna zrna < 0,063 mm je toto minimální množství vzorku vlhké zeminy 30 g. Připravený vzorek zeminy se zváží, poté se nechá vysušit v sušičce. Následně se vzorek opět zváží a stanoví se vlhkost dle vztahu (1).



Obrázek 3: Trojfázový systém zemin [9]

Míru vyplnění pórů vodou vyjadřuje stupeň nasycení S_r , který je definován jako poměr objemu vody V_w k objemu pórů V_p nebo jako funkci objemových hmotností. [10]

$$S_r = \frac{\rho_s * (\rho - \rho_d)}{(\rho_s - \rho_d) * \rho_w}, \quad (2)$$

kde ρ je objemová hmotnost zeminy v přirozeném stavu, ρ_s měrná hmotnost skeletu, ρ_d objemová hmotnost suché zeminy a ρ_w objemová hmotnost vody.

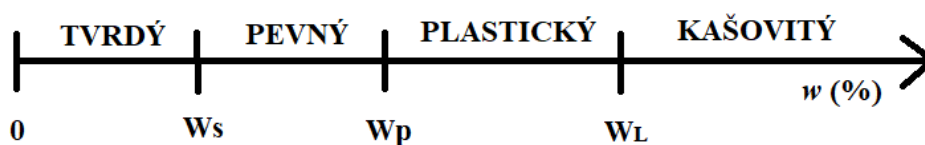
4. Konzistenční stavy, konzistenční meze

Konzistenční stav je fyzikální stav soudržných zemin závislý na množství vody obsažené v zemině. Soudržné zeminy mohou v přírodě obsahovat volnou i vázanou vodu. Vázaná voda je v zemině vázána různými silami dle zastoupení a povahy jílovitých minerálů. Množství vody v zemině narůstá s podílem a typem jílových minerálů. Při stejné vlhkosti mohou mít zeminy různou konzistenci (Obrázek 4). Vlhkost w je nepostradatelný parametr, který charakterizuje fyzikální stav soudržné zeminy. [1]

Pokud smícháme dostatečné množství vody se zeminou, připravíme kaši, která se chová jako viskózní kapalina. Jedná se o tekutý stav zeminy. V případě, že necháme zeminu vysychat a snížíme tak její vlhkost, začne se jílovitá zemina držet pohromadě a nabývat určitou odolnost vůči deformaci. V této fázi se jedná o plastický stav zeminy. Při další ztrátě vody zemina zmenšuje svůj objem a její tuhost se zvětšuje, až zemina začne křehnout. S pokračujícím sušením se zemina stále smršťuje v poměru k množství vysušené vody, dokud nedosáhne limitního smrštění. Za tímto bodem již nedochází k dalšímu zmenšování objemu a jedná se o tvrdý stav zeminy. [4]

Šimek [1] popisuje konzistenční stavy zemin pomocí hmatové a vizuální zkoušky takto:

- **Kašovité (tekutý) stav** – zemina se v sevřené pěsti protlačuje mezi prsty, tato zemina se chová jako hustá, viskózní tekutina.
- **Plastický stav** – tento stav dále rozdělujeme na:
 - 1) tuhý stav – zemina se těžce hněte, lze z ní válet válečky v průměru 3 mm.
 - 2) měkký stav – zemina se lehce hněte.
- **Pevný stav** – tato zemina má vlivem nižší vlhkosti tmavší zbarvení a drobí se, nelze z ní vyválet válečky o průměru 3 mm.
- **Tvrdý stav** – tato zemina má vlivem malé vlhkosti velmi světlou barvu a lze ji rozbít na ostrohranné kusy. Vlhkost této zeminy je natolik malá, že je voda stahována dovnitř zeminy kapilárními a sorpčními silami.



Obrázek 4: Konzistenční stavy a meze [9]

ČSN EN ISO 14688-1,2 (duben 2018) a podobně i Atkinson [11] rozlišuje pět konzistenčních stavů: velmi měkký, měkký, pevný, tuhý a velmi tuhý (Tabulka 1). Podobné rozdělení do pěti skupin konzistenčních stavů je také uvedeno v normě ČSN 73 1005 (listopad 20216), (Tabulka 2). Konzistenční stav je v uvedených klasifikacích určován podle velikosti indexu konzistence I_c , který je definován níže vztahem (3).

Konzistenční stavy	Index konzistence I_c (-)	Neodvodněná smyková pevnost s_u (kPa) [11]
Velmi měkký (very soft)	< 0,25	< 20
Měkký (soft)	0,25 až 0,50	20 až 40
Pevný (firm)	0,50 až 0,75	40 až 75
Tuhý (stiff)	0,75 až 1,00	75 až 100
Velmi tuhý (very stiff)	> 1,00	> 100

Tabulka 1: Druhy konzistenčních stavů dle ČSN EN ISO 14688-1,2 (duben 2018) a dle Atkinsona [11]

Konzistenční stavy	Index konzistence I_c (-)
Kašovitá	< 0,05
Měkká	0,05 – 0,50
Tuhá	0,50 – 1,00
Pevná	>1,00
Tvrdá	-

Tabulka 2: Druhy konzistenčních stavů dle ČSN 73 1005 (listopad 2016)

Mezi jednotlivými konzistenčními stavy existují konzistenční meze, což jsou smluvní meze, při kterých dochází k přechodu zeminy z jednoho stavu do druhého vždy za stejných charakteristických vlhkostí dané zeminy [1]. Určujeme tři základní konzistenční meze: mez smrštění w_s , mez plasticity w_p a mez tekutosti w_L (Obrázek 4).

Jednotlivé konzistenční meze tvoří pomyslné hranice mezi konzistenčními stavy. Mezi stavem kašovitým a plastickým (měkkým) se nachází mez tekutosti w_L . Mezi plastickou (tuhou) a pevnou fází se nachází mez plasticity w_p a mezi stavem pevným a tvrdým nalezneme mez smrštění w_s .

Jako první použil tyto meze pro charakteristiku konzistence zemědělských půd švédský vědec Dr. A. Atterberg v roce 1911, tyto meze označujeme také jako Atterbergovy meze. Původně byly určovány pomocí jednoduchých testů s použitím odpařovací misky. V roce 1932 tyto postupy přesněji definoval profesor A. Casagrande. Navrhl také mechanické zařízení pro určení meze tekutosti známé jako Casagrandeho přístroj. V mnoha zemích je tento přístroj nahrazován penetračními kužely. [4]

Vlhkost sama o sobě nestačí k charakterizování konzistenčního stavu soudržné zeminy. Je potřeba vlhkost zeminy vztáhnout k vlhkosti na mezi tekutosti a vlhkosti na mezi plasticity. Například dvě různé zeminy mohou mít stejnou vlhkost, avšak vykazují zcela odlišné vlastnosti. Vztah vlhkosti zeminy k mezím tekutosti a plasticity lze vyjádřit dvěma způsoby, buď to pomocí indexu konzistence I_c [12], nebo indexu tekutosti I_L [13], které jsou definovány těmito vztahy:

$$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} = \frac{w_L - w}{I_P} \quad (3)$$

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} = \frac{w - w_P}{I_P} \quad (4)$$

$$I_L = 1 - I_c \quad (5)$$

kde w_L je vlhkost na mezi tekutosti, w_P je vlhkost na mezi plasticity a I_P je index plasticity.

Konzistence soudržných zemin rozhoduje o vhodnosti těchto zemin pro základové půdy pro plošné a pilotové základy. Dále také ovlivňuje vlastnosti zemin, jako jsou pevnost a stlačitelnost. [1]

4.1 Mez tekutosti

Mez tekutosti w_L je hranicí mezi plastickým a kašovitým (tekutým) stavem. Tato mez se určuje pomocí Casagrandeho přístroje nebo kuželovou zkouškou. Vlhkost na mezi tekutosti w_L odpovídá vlhkosti zeminy, při které se dvě poloviny koláčků zeminy v Casagrandeho misce slijí v délce 10 mm u paty rýhy po 25 úderech misky dopadající z výšky 10 mm s frekvencí 2 údery za vteřinu (Obrázek 5). Postup stanovení meze tekutosti v ČR určuje norma ČSN EN ISO 17892 – 12 (listopad 2018).

Mez tekutosti lze stanovit rovněž pomocí kuželové zkoušky, která primárně slouží k stanovení neodvodněné smykové pevnosti (Obrázek 6). Vlhkost na mezi tekutosti odpovídá penetraci 20 mm kužele do vzorku zeminy při použití 80 g kužele s vrcholovým úhlem 30°. Pokud je použit kužel s hmotností 60 g s vrcholovým úhlem 60°, pak vlhkost na mezi tekutosti odpovídá penetraci 10 mm. Pro účely této práce byl použit kužel s vrcholovým úhlem 30° a hmotností 80 g. Penetrační rozsah kužele 80g/30° je od 15 mm do 25 mm. Je povolen maximální rozdíl mezi dvěma po sobě následujícími odečty 0,5 mm.



Obrázek 5: Casagrandeho přístroj (zdroj autor)

Pro obě zkoušky se používá vzorek zeminy se zrný menšími než 0,4 mm. Norma doporučuje vzorek předem nevysušovat a zkoušet ho v přirozeném stavu. Připravenou zeminou zaplníme misku tak, aby v misce nebyly žádné bubliny. Přebytečná zemina se stáhne srovnávacím nožem, aby se vytvořil hladký, rovný povrch. Penetrační kužel se spustí tak, aby se hrot dotýkal zeminy. V tento moment se zaznamená počáteční nulové čtení. Poté dojde k uvolnění kužele, který se zabořuje do zeminy po dobu 5 sekund, zaznamená se hodnota zaboření. Výsledkem penetrace je rozdíl mezi konečnou a počáteční polohou dříku kužele.



Obrázek 6: Kuželová zkouška (zdroj autor)

Výsledky kuželové zkoušky se vynášení do grafu, kde na vodorovnou osu se zaznamenává penetrace a na svislou osu vlhkost. Při použití kužele 60g/60° je osa x v logaritmickém měřítku, osa y v měřítku lineárním. V případě kuželu 80g/30° se vynášejí obě osy v měřítku lineárním. (ČSN EN ISO 17892-12 (listopad 2018))

Je obecně známo, že obě metody (Casagrandeho miska a kuželová zkouška) podávají rozdílné výsledky. Tato skutečnost je akceptována i současnou platnou normou, popisující stanovení vlhkosti na mezi tekutosti ČSN EN ISO 17892-12 (listopad 2018). Obě metody se ve svých výsledcích shodují, pohybuje-li se w_L kolem 30 až 40 %. Při vyšších hodnotách w_L podává Casagrandeho miska vyšší výsledné hodnoty oproti kuželové zkoušce a při nižších hodnotách w_L podává Casagrandeho miska nižší výsledné hodnoty vlhkosti v porovnání s výsledky kuželové zkoušky.

4.2 Mez plasticity

Mez plasticity w_P je hranicí mezi pevným a plastickým stavem. Tato mez odpovídá vlhkosti, při které se válečky o průměru 3 mm dané zeminy začínají rozpadat na kusy (Obrázek 7). Není-li možné vyválet válečky o průměru 3 mm, považujeme vzorek za neplastický. Stanovení vlhkosti na mezi plasticity určuje v ČR norma ČSN EN 17892-12 (listopad 2018).



Obrázek 7: Stanovení meze plasticity (zdroj autor)

4.3 Index plasticity I_p

Index plasticity nám určuje rozmezí vlhkostí, ve kterém je zemina plastická. Stanovuje se jako rozdíl mezi w_L (mez tekutosti) a w_p (mez plasticity). Plastická zemina má schopnost vázat vodu, aniž by došlo ke změně jejího stavu. Čím větší index plasticity je, tím více jílovitých minerálů zemina obsahuje (Tabulka 3).

Kategorie zemin	Index plasticity I_p (%)	Plasticita
I. zeminy písčité	< 1	
II. písčité hlíny	1 – 10	Nízká
III. písčité a prachové jíly	10 – 20	Střední
IV. jíly	>20	Vysoká

Tabulka 3: Index plasticity (ČSN EN ISO 14688)

4.4 Mez smrštění a křivka smrštění

Ke smršťování zemin, tedy ke zmenšování jejich objemu, dochází až do té doby, kdy zemina dosáhne meze smrštění. Za hranici meze smrštění se zemina považuje za pevnou látku (zemina je v tvrdém konzistenčním stavu). Náchylné na smršťování jsou především jíly, méně náchylné pak hlíny a písky (BS 1377-2).

Přibližné hodnoty vlhkosti na mezi smrštění pro tři základní jílovité minerály shrnuje Tabulka 4.

Minerály	Mez tekutosti (%)	Mez plasticity (%)	Mez smrštění (%)
Montmorillonit	100 – 900	50 – 100	8,5 – 15
Illit	60 – 120	35 – 60	15 – 17
Kaolinit	30 – 110	25 – 40	25 – 29

Tabulka 4: Hodnoty Atterbergových mezí pro jílové minerály [28]

Stanovení vlhkosti na mezi smrštění popisuje ČSN 72 1019 (květen 1990), pomocí zkoušky na tělísku vyříznutého z neporušeného vzorku. Princip zkoušky spočívá v monitorování změn objemu zkušebního tělíska v průběhu smršťování. Měří se průměr ve dvou vzájemně kolmých směrech a výška a zaznamenává se také hmotnost pro stanovení vlhkosti. Počáteční rozměry zkušebního válcovitého tělíska jsou: průměr 60 mm, výška 45 mm. Rychlost smršťování zemin je regulována a nesmí např. u jílu překročit 7–10 % změny vlhkosti za den. Četnost měření je volena tak, aby změna vlhkosti mezi jednotlivými měřeními byla 2–3 %. Zkouška probíhá

až do okamžiku, kdy změna rozměrů není z hlediska vyhodnocení zkoušky významná. Poté se vzorek vloží do sušičky a suší se při 50 °C až do ustálení hmotnosti. Poté se vyjme ze sušičky a po vychladnutí v exikátoru se změří a zváží. Následuje dosušení vzorku při teplotě 105 °C, ochlazení a zvážení. Poslední hmotnost slouží ke stanovení vlhkosti zeminy. Výsledná měření se vynášejí do grafu závislosti vlhkosti w (%) na poměrném objemovém smrštění s_v (%). Poměrné smrštění je definováno jako poměr zmenšení objemu vzorku zeminy v důsledku snížení jeho vlhkosti k objemu vzorku vysušeného při 50 °C. Průnikem směrnice lineární části křivky s vodorovnou osou je mez smrštění w_s .

Britská norma BS 1377-2: 1990 popisuje stanovení meze smržitelnosti w_s třemi způsoby.

1. První metodou se určuje w_s měřením objemových změn na válcovitém vzorku zeminy v neporušeném nebo rekonstituovaném stavu. Počáteční rozměr válcovitého tělíska zeminy má mít průměr d_v od 38 mm do 51 mm. Výška vzorku v rozmezí d_v až $2d_v$. Principiálně jde o stejný přístup jako v ČSN 72 1019. Zemina je také vážena a měřena a poté, co již nezmenšuje svůj objem je vysušena při 105 °C. Naměřené hodnoty se pak vynášejí do grafu závislosti vlhkosti na objemu v podobě křivky smrštění (Obrázek 10). Mez smrštění w_s je dána průsečíkem dvou přímk: jedna je směrnici přímkové části křivky (linie AB), druhá přímka je vodorovná a vychází z bodu odpovídající objemu vysušeného vzorku. Další charakteristikami jsou číslo smrštění R_s (shrinkage ratio) a objemové smrštění V_s (volumetric shrinkage), které jsou definovány takto

$$R_s = \frac{m_d}{V_d} \quad (6)$$

$$V_s = \frac{w - w_s}{R_s}, \quad (7)$$

kde R_s (-) je číslo smrštění, V_s (-) objemové smrštění, m_d (g) hmotnost suché zeminy, V_d (ml) objem vody vytlačené zeminou po vysušení v sušičce, w (%) vlhkost a w_s (%) vlhkost na mezi smrštění.

2. Druhá metoda také spočívá ve sledování objemových a hmotnostních změn na malém vzorku zeminy, kterým je pečlivě vyplněna porcelánová či kovová váženka s vnitřním průměrem 44 mm a výškou 12 mm. Tento vzorek zeminy je zbavený zrn větších než 0,425 mm, předem se nevysušuje a je smíchán s takovým množstvím destilované vody, aby měl vlhkost o něco vyšší než vlhkost na mezi tekutosti. I u této metody se vzorek v průběhu vysušování váží. Objem se stanovuje ponořením vzorku do rtuti.

Výsledná data se vynášejí podobně jako u první metody do grafu závislosti vlhkosti na objemu. Další parametr, který při smršťování určujeme je rozsah smrštění. Je to rozdíl mezi vlhkostí na začátku zkoušky (w_{vz}) a vlhkostí na mezi smrštění (w_s).

$$\text{Rozsah smrštění} = w_{vz} - w_s \text{ [%]} \quad (8)$$

3. Třetí metoda spočívá v měření pouze lineárního smrštění porušeného vzorku. I pro tuto metodu se používá vzorek zeminy se zrny menšími než 0,425 mm. Připravenou pastou s vlhkostí odpovídající vlhkosti na mezi tekutosti se naplní formičky Obrázek 8. Vzorek ve formičce se nechává vysušovat nejprve při pokojové teplotě. Poté, co se zemina oddělí od stěn formičky, pokračuje se v sušení v sušičce při teplotě ne vyšší než 65 °C. V konečné fázi se pak vzorek dosuší při teplotě 105 – 110 °C. Hodnota lineárního smrštění je pak dána vztahem

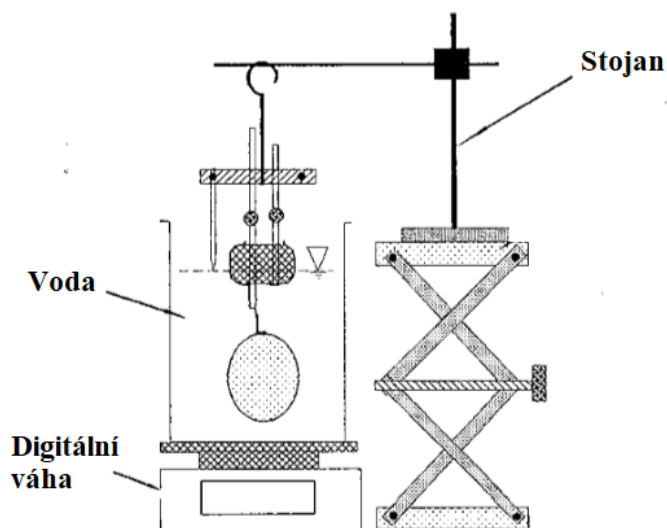
$$\text{Lineární smrštění} = 1 - \frac{L_D}{L_o} \text{ [%]} \quad (9)$$

kde L_D (mm) je délka vysušeného vzorku, L_o (mm) počáteční délka vzorku.



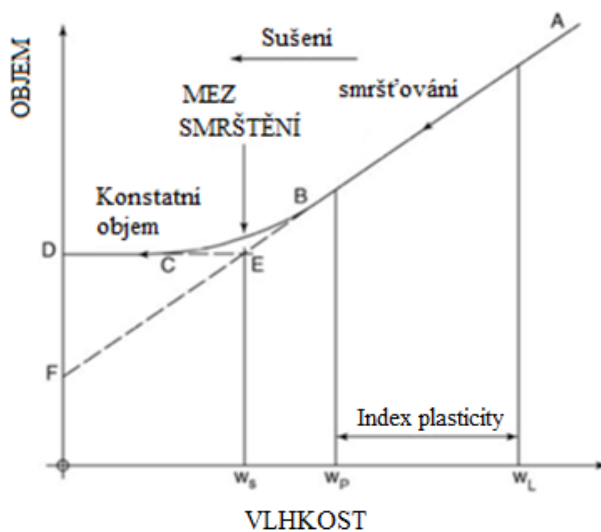
Obrázek 8: Forma pro stanovení lineárního smrštění (vnitřní délka 140 mm, vnitřní průměr 12,5 mm)
[15]

Tariq [31] popisuje ve své studii stanovení křivky smrštění na porušeném vzorku zeminy balónkovou metodou, která je založena na principu postupného měření objemu zeminy v balónku a pravidelném vážení vzorku během vysušování. Výhodou této metody je její jednoduchost a zdravotní nezávadnost, neboť se při měření nemanipuluje se rtutí. Schéma balónkové metody je znázorněno na Obrázek 9. Detailní popis metody se nachází v kapitole 5.7.



Obrázek 9: Schéma balónkové metody [31]

Jak již bylo uvedeno, proces smršťování lze graficky znázornit tzv. křivkou smrštění (Obrázek 10). Na vodorovné ose je vynesena vlhkost s vyznačením konzistenčních mezí a na svislé ose je objem zeminy. Část grafu mezi body A a B je lineární, což ukazuje, že ztráta vody zeminy je přímo úměrná poklesu jejího objemu. Vlevo od bodu C nedochází k dalšímu zmenšování objemu i přesto, že se zemina dále vysušuje, a tedy ztrácí vodu. Přechodovou zónu mezi těmito dvěma stavy tvoří křivka mezi body B a C. Vlhkost na mezi smrštění odpovídá bodu E, který se stanovuje jako průsečík křivek AB a CD. Bod F znázorňuje takovou hodnotu smrštění zeminy, u které by nevznikly vzduchové dutiny, to znamená, že by se pevné části spojily dohromady a vytvořily by tak jeden kus zeminy. Hodnota F tedy představuje objem sušiny (skeletu) v půdní hmotě.

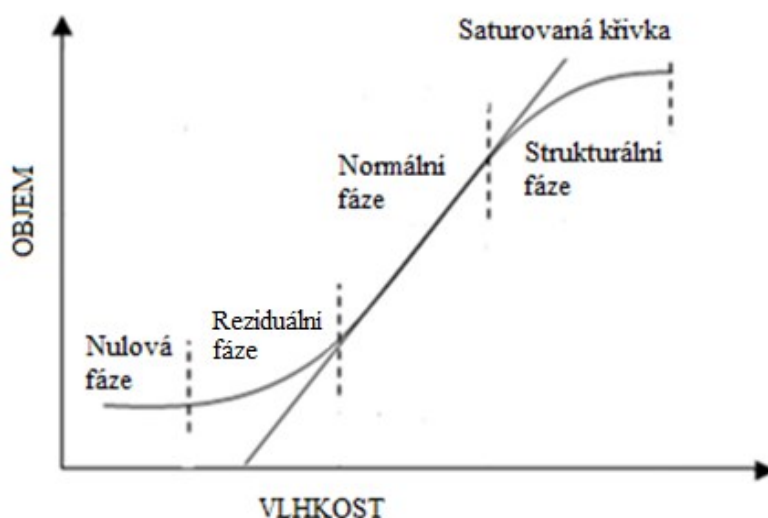


Obrázek 10: Křivka smrštění [10]

Křivka smršťování je charakterizována čtyřmi fázemi (Obrázek 11): fází strukturální, normální, zbytkovou (reziduální) a nulovou fází smrštění. V oblasti strukturální a zbytkové fáze je snížení objemu zeminy menší než množství vysušené vody. V oblasti normální fáze se snížení objemu rovná extrahované vodě. V oblasti nulové fáze dochází k nejhustější konfiguraci částic a objem zeminy se dále nemění. [16]

Výsledky zkoumání některých jílových zemin nemusí vykazovat všechny čtyři zóny. V některých případech zcela chybí strukturální zóna nebo zóna nulového smrštění. [16]

Jako první, zřejmě v roce 1924, stanovil a popsal křivku zrnitosti William B. Haines [23], který podrobil vzorek jílovité zeminy zkoušce pro stanovení vlhkosti na mezi smrštění. Kuželový vzorek s počáteční vlhkostí odpovídající vlhkosti na mezi tekutosti se nechal postupně vysušovat a jeho změny objemu se zaznamenávaly pomocí noření vzorku do rtuti. Následně pak ze získaných hodnot stanovil Haines první křivku smrštění. Haines definuje smrštění jako specifickou změnu objemu jílovité zeminy vzhledem k jejímu obsahu vody [23].



Obrázek 11: Fáze křivky smrštění [16]

Mikrostrukturální vývoj zeminy v závislosti na obsahu vody a jejím objemu nám znázorňuje Obrázek 12. Struktura zeminy je tvořena shluky jemných částic a prázdnými prostory (V_{pmi}), které je oddělují. Je dokázáno, že voda je postupně vylučována z makropórů, následně z mikropórů. Z počátečního nasyceného stavu zeminy ztrácí makropóry svou vodu, až do bodu C (Obrázek 12). Bod C představuje přechodový bod z fáze strukturálního smrštění na fázi normálního smrštění. Z bodu B až do bodu D ztrácí mikropóry vodu bez přívodu vzduchu.

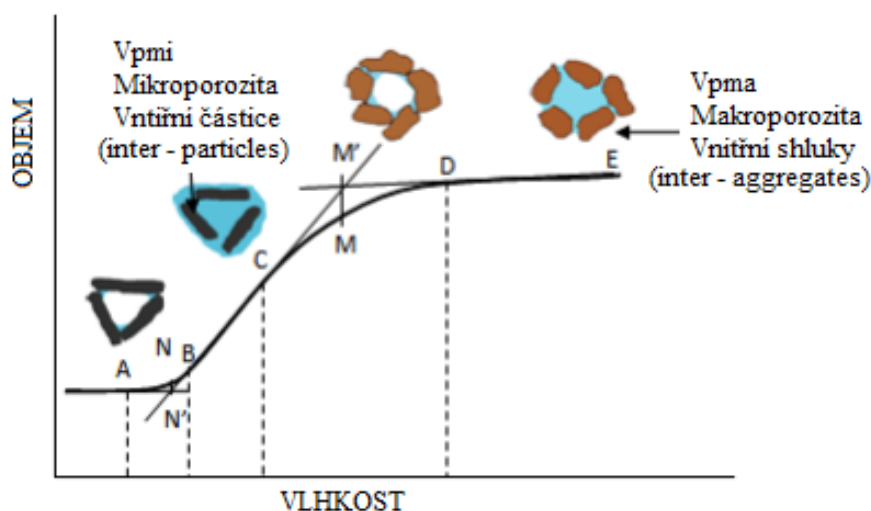
Podle Braudeaua [17] se voda odpařuje z pórů ve dvou fázích. První fáze je taková, při které voda opouští póry bez přívodu vzduchu, čímž dochází k přibližování jemných částic. Při druhé fázi dochází k výměně vody a vzduchu v pórech a jemné částice jsou vzájemně spojeny. Tyto dvě fáze pokrývají zakřivené části křivky smrštění CD a BA. Body M a N představují průsečíky směrnic lineárních částí křivky. Tyto parametry nám umožňují vypočítat minimální a maximální objem mikropórů a kapacitu bobtnání CG .

$$\max V_{pmi} = \frac{w_M}{\rho_w} \quad (10)$$

$$\min V_{pmi} = \frac{w_N}{\rho_w} \quad (11)$$

$$CG(\max V_{pmi} - \min V_{pmi}) = \frac{w_M - w_N}{\rho_w} \quad (12)$$

kde w_M a w_N jsou vlhkosti v bodech M a N křivky smrštění a ρ_w je objemová hmotnost vody.



Obrázek 12: Mikrostrukturální vývoj zeminy [25]

Je nutné uvést, že velikost vzorku ovlivňuje sklon křivky smrštění [16]. Čím menší vzorek zeminy je, tím je křivka smrštění přesnější, neboť je zde méně makropórů. Skutečnou mez smrštění je velice těžké zjistit, neboť vyžaduje nepřetržité měření.

V dnešní době stále častěji dochází k analýze smrštění v oblasti zemědělství. Křivka smrštění umožňuje charakterizovat pórové systémy zemin a jejich bobtnání se zvětšujícím se obsahem vody. Křivka smrštění se stává jedinečnou možností hodnocení dopadu hospodaření na půdu. [24]

Křivku smrštění lze popsat pomocí matematických modelů. Některé z těchto modelů popisuje ve své práci Bensallam [16]. Model Giráldeze popisuje fázi nulovou, normální a zbytkovou pomocí dvou parametrů. Model McGarryeho a Malafanta popisuje fáze smrštění pomocí čtyř parametrů. Mezi dalšími modely můžeme nalézt například model Kima, který zobrazuje pouze normální fázi křivky smrštění. [16]

4.6 Potenciál smrštění zemin

Potenciál smrštění vyjadřuje míru schopnosti zeminy zmenšovat svůj objem během vysychání. Čím více je zemina k smršťování náchylnější, tím více je riziková např. pro zakládání staveb. Jones [22] ve své studii používá index plasticity I_P a procentuální zastoupení jílovité frakce k určení potenciálu zeminy ke smršťování (Tabulka 5). Z tabulky je zřejmé, že čím více je v zemině jílovité frakce (zrna $< 0,002$ mm) a čím větší je index plasticity, tím více je zemina náchylnější k smrštění (a také k bobtnání).

Index plasticity (%)	Obsah jílovité frakce (%)	Potenciál smrštění
> 35	> 95	Velmi vysoký (Very High)
22 – 48	60 – 95	Vysoký (High)
12 – 32	30 – 60	Střední (Medium)
< 18	< 30	Nízký (Low)

Tabulka 5: Potenciál smrštění jílovitých zemin [22]

4.7 Potenciál bobtnání zemin

Potenciál bobtnání vyjadřuje míru schopnosti zeminy zvětšovat svůj objem během zvyšování vlhkosti. Klasifikační systémy, které třídí zeminy podle potenciálu bobtnání, uvádí ve své studii Yilmaz [27]. Holtz [28] stanovuje míru bobtnání pomocí procentuálního obsahu jílovitých částic, indexu plasticity a vlhkosti na mezi smrštění (Tabulka 6): Raman [29] posuzuje potenciál zeminy k bobtnání dle indexu plasticity a indexu smrštění, který je definován jako rozdíl vlhkosti na mezi tekutosti a vlhkosti na mezi smrštění (Tabulka 7).

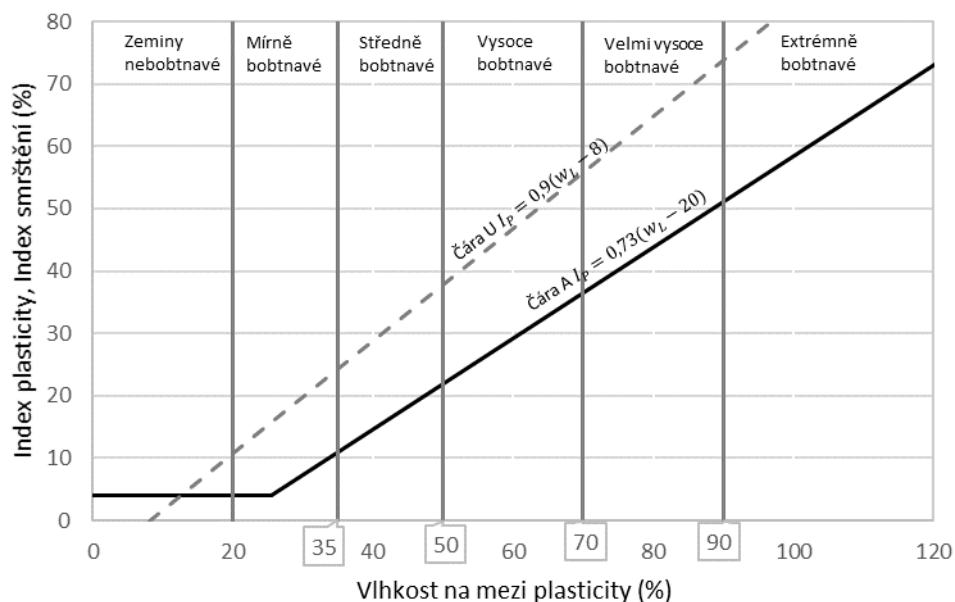
Obsah jílovité frakce (%)	Index plasticity (%)	Vlhkost na mezi smrštění (%)	Potenciál bobtnání
>28	>35	<11	Velmi vysoký (Very High)
20 – 31	25 – 41	7 – 12	Vysoký (High)
13 – 23	15 – 28	10 – 16	Střední (Medium)

Tabulka 6: Potenciál smrštění dle Holtze [28]

Index plasticity (%)	Index smrštění $I_S = w_L - w_S$ (%)	Potenciál bobtnání
>32	>40	Velmi vysoký (Very High)
23 – 32	30 – 40	Vysoký (High)
12 – 23	15 – 30	Střední (Medium)
<12	<15	Nízký (Low)

Tabulka 7: Potenciál smrštění dle Ramana [29]

Casagrandeho plasticitní diagram využívá pro stanovení potenciálu bobtnání Dakshanamurthy [30] (Obrázek 13).



Obrázek 13: Casagrandeho plasticitní diagram [30]

4.8 Využití parametru vlhkosti na mezi smrštění

Procesy smršťování a bobtnání jsou charakteristické především svými objemovými změnami. Tyto objemové změny lze pochopit právě díky vlhkosti na mezi smrštění. Stanovení objemových změn při smršťování lze provést metodami popsány výše.

Vlhkost na mezi smrštění je spolu s dalšími konzistenčními mezemi důležitá popisná charakteristika především pro jílovité zeminy. Tyto zeminy se vyznačují významnou změnou

objemu spojenou se změnami obsahu vody. Tyto změny se projeví v podobě bobtnání nebo smršťování. Schopnost zeminy se smršťovat nebo bobtnat se vyjadřuje pomocí potenciálu smršťování a potenciálu bobtnání, které byly popsány v předešlé kapitole. Zvláštní důraz je nutno klást na takové zeminy, které mají vysoký potenciál bobtnání a potenciál smršťování. Nejvíce náchylné zeminy na bobtnání či smršťování jsou ty, které obsahují jílové minerály ze skupiny smectitu, které dokáží absorbovat velké množství vody [22].

Procesy smršťování a bobtnání jsou také dány množstvím vody v okolí. Zóna zeminy podléhající vlivům smršťování a bobtnání sahá do hloubky tří metrů, ale může být také rozšířena přítomností kořenů stromů. Během procesu smršťování dochází k tvorbě trhlin, které se při opětovném sycení půdy nikdy dokonale neodstraní, a tak dochází k nepatrným rozpadům půdy, což vede k větší schopnosti zeminy absorbovat vodu, a tudíž i k většímu bobtnání. Dalším důležitým faktorem jsou srážky v oblasti, neboť zemina náchylná na objemové změny absorbuje velké množství srážkové vody a stane se tak lepivá a velmi těžká. Naopak ve velmi suchých oblastech, dochází ke zmenšování objemu a praskání půdy. Právě faktory každodenního života jako jsou srážky, sucho, kácení lesů či nová výsadba a mnohé další vedou k objemovým změnám zemin, které se poté negativně odrážejí na okolních stavbách ve formě prasklin zdiva či porušení konstrukce. K poškození základů staveb dochází často vinou růstu stromů, díky kterému došlo ke smrštění zemin v důsledku snížení vlhkosti. Při růstu dochází k narušování země kořeny a smrštěním země odstraněním vody. Porušení budovy vlivem růstu kořenů stromů v okolí budovy zobrazuje Obrázek 14. [22]



Obrázek 14: Porucha budovy vlivem smrštění [22]

V důsledku kapilárního napětí dochází ke stlačování. V přírodě dochází ke smršťování během suchých a teplých dní, které zapříčiňuje sedání a trhliny v jílech. [19]

Pokud nejsou stavby založeny na hlubokých základech, stává se bobtnání značným problémem, neboť dochází k poškození konstrukce. Bobtnání se může také projevit při chemické změně základové půdy, například okysličením. [20]

Ve stavebnictví mohou mít tyto procesy za vinu porušení budov vlivem poklesu či zvedání základů a zničení majetku. Těmto problémům lze předcházet vhodnou volbou základů jako například volbou hlubinných základů. Volbu základu je třeba uskutečnit na základě výsledků inženýrsko-geologického průzkumu. Vhodné je také zakládat stavbu v jednotné hloubce a nesnižovat/nezvyšovat hladinu podzemní vody v okolí stavby. V České republice můžeme nalézt tyto oblasti náchylné na smršťování: okolí Brna, Ústí nad Labem, Žatecko, Ústí nad Orlicí a Turnovsko. [21]

5. Laboratorní měření

Laboratoř, ve které byly všechny zkoušky provedeny, se nachází na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě v Ostravě, Fakultě stavební.

5.1 Popis vzorků

Předmětem zkoumání byly tři zeminy.

Vzorky zemin obsahovaly všechny minerální složky vrstvy, ze které byla zemina odebrána. Vzorky nebyly znečištěny jakýmkoliv cizím materiálem ani příměsemi použitými při odběru vzorku. Dva vzorky byly odebrány ručně a třetí vzorek „SČ“ je z vrtného průzkumu.

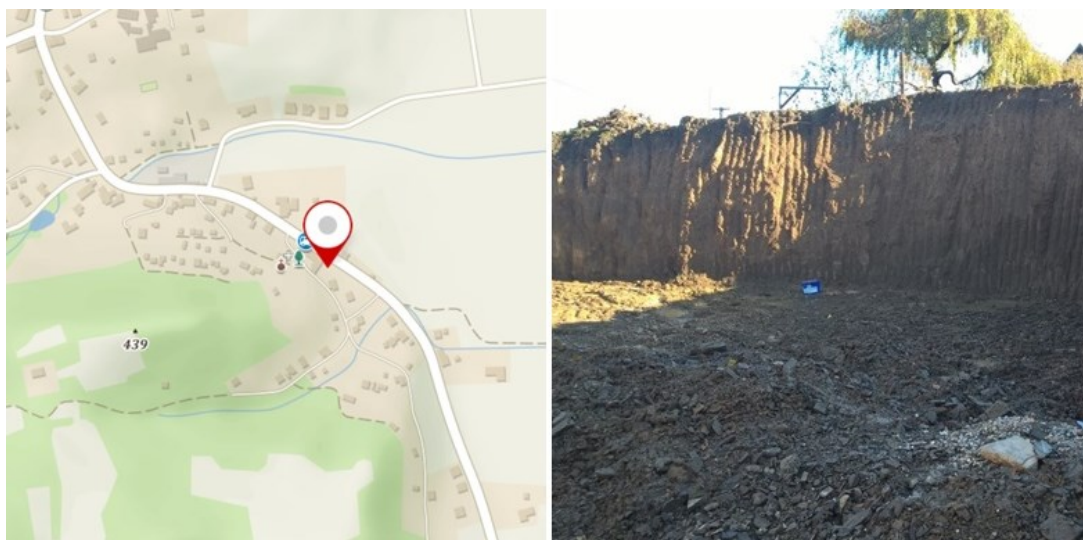
Vzorky pro laboratorní měření dělíme do pěti kvalitativních tříd, které závisí na vlastnostech zeminy, o nichž se předpokládá, že zůstaly nezměněny během odběru vzorku, manipulace s ním, dopravy a skladování. Tyto třídy znázorňuje Tabulka 8. Popis vzorků zemin musí vyhovovat EN ISO 14688-1.

Vlastnosti zeminy/třída kvality	1	2	3	4	5
Vlastnosti zeminy zachované beze změny					
Zrnitost	•	•	•	•	
vlhkost	•	•	•		
ulehlost, relativní hustota, propustnost	•	•			
stlačitelnosti, smyková pevnost	•				
Vlastnosti, které mohou být stanoveny	1	2	3	4	5
vrstevní sled	•	•	•	•	•
hranice vrstvy - hrubé	•	•	•	•	
hranice vrstvy - jemné	•	•			
Atterbergovy meze	•	•	•	•	
vlhkost	•	•	•		
ulehlost, relativní hustota, pórovitost	•	•			
stlačitelnost, smyková pevnost	•				

Tabulka 8: Třídy kvality vzorků zemin [7]

Vzorek „M“ z obce Metylovice

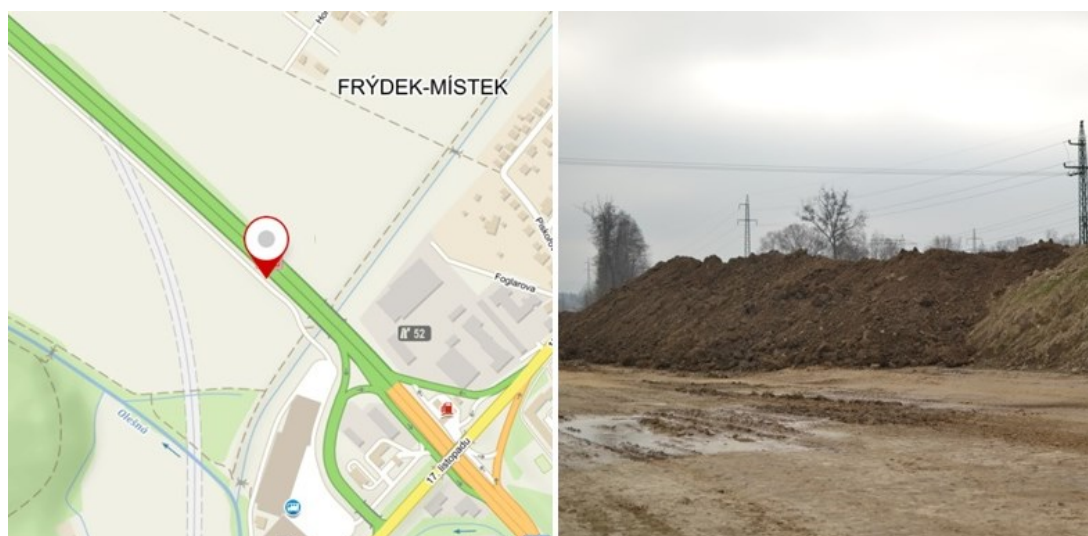
Vzorek „M“ byl pro laboratorní měření odebrán v obci Metylovice z pozemku u domu s adresou Metylovice č. p. 119, Metylovice (Obrázek 15). GPS souřadnice místa odběru vzorku jsou 49,605588N a 18,342595E. Vzorek byl odebrán při realizaci zářezu, z hloubky 3 m pod původní úroveň terénu.



Obrázek 15: Místo odběru vzorku M (zdroj autor)

Vzorek „FM“ z obce Frýdek-Místek

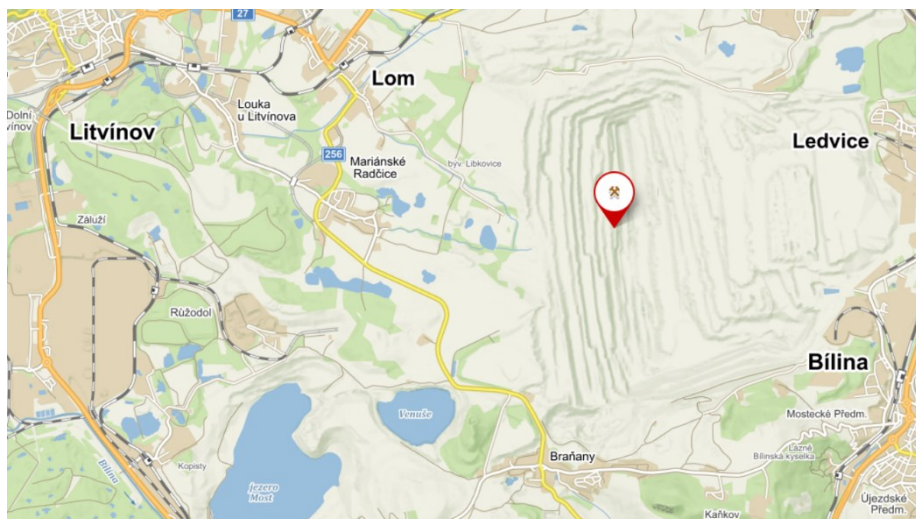
Vzorek „FM“ byl pro laboratorní měření odebrán v obci Frýdek-Místek ze stavby obchvatu města Frýdek-Místek – Nový Jičín (Obrázek 16). GPS souřadnice místa odběru vzorku jsou 49,6780917N a 18,3240672E.



Obrázek 16: Místo odběru vzorku FM (zdroj autor)

Vzorek „SČ“ ze Severních Čech

Vzorek „SČ“ byl pro laboratorní měření odebrán z povrchového lomu Bílina v Severních Čechách, severozápadně od města Most (Obrázek 17). Vzorek byl odebrán z výsypky dolu, z hloubky 20 m. GPS souřadnice místa odběru vzorku jsou 50,5727914N a 13,7148586E.



Obrázek 17: Místo odběru vzorku SČ

5.2 Stanovení zrnitosti zemin

Dle ČSN EN ISO 17892-4 (listopad 2017).

Stanovení zrnitosti zemin patří mezi základní zkoušky v laboratořích mechaniky zemin. Na základě zatřídění zrn do jednotlivých frakcí získáme procentuální zastoupení zrnitostních skupin. Pomocí těchto výsledků můžeme pak zeminu klasifikovat např. dle ČSN 73 1005. Stanovení zrnitosti se provádí dvěma způsoby – sítovou a sedimentární metodou. Sítový rozbor dělíme dále na mokrý a suchý. Suchý sítový rozbor je vhodný pouze pro čisté štěrky a písky. Mokrý způsob je založen na promývání vzorku zeminy vodou. Zrna zachycená na sítích o velikosti $\geq 0,063$ mm se nechají vysušit v sušičce, a poté se s nimi provede suchý sítový rozbor pomocí normových sít. Zrna menší než 0,063 mm se podrobí hustoměrné nebo pipetovací zkoušce, tyto zkoušky patří mezi zkoušky sedimentační. Hustoměrná zkouška vychází ze Stoklasova zákona. Průměry zrn se tedy určují na základě rychlosti usazování částic ve vodě [16].

První dva vzorky zeminy „M“ a „FM“ byly analyzovány mokrým sítovým rozbořem a hustoměrnou zkouškou. Třetí vzorek „SČ“ byl podroben pouze hustoměrné zkoušce, protože obsahoval pouze jemnozrnnou frakci.

Při mokřém sítovém rozboru byla nejprve oddělena od vzorku o hmotnosti 2,5 kg pomocí sít zrna menší než 0,063 mm od ostatních. Aby nedošlo k protržení síta, promýval se vzorek rovněž přes síta 0,5 mm, 1 mm a 2 mm. Zrna menší než 0,063 mm se zachytávala do mís. Tyto mísy a také zrna větší než 0,063 mm se nechaly vysušit. Po vysušení byly zaznamenány hmotnosti suchého vzorku. Zrna větší než 0,063 mm byla podrobena suché sítové zkoušce, jednotlivé frakce byly zváženy a vyjádřeny v procentuálních podílech (Obrázek 18).

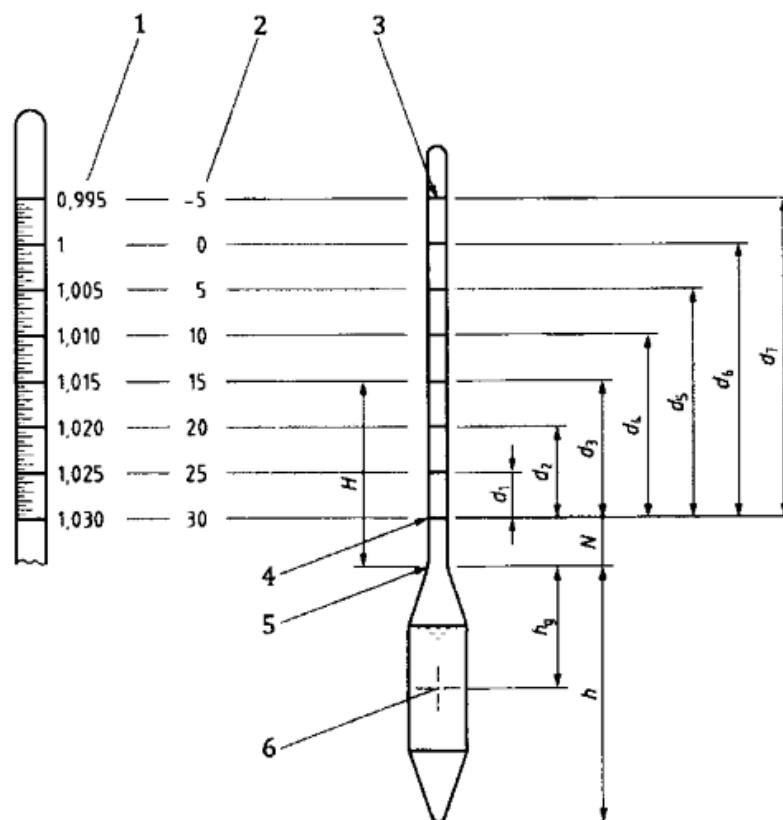


Obrázek 18: Normová síta pro síťovou zkoušku (zdroj autor)

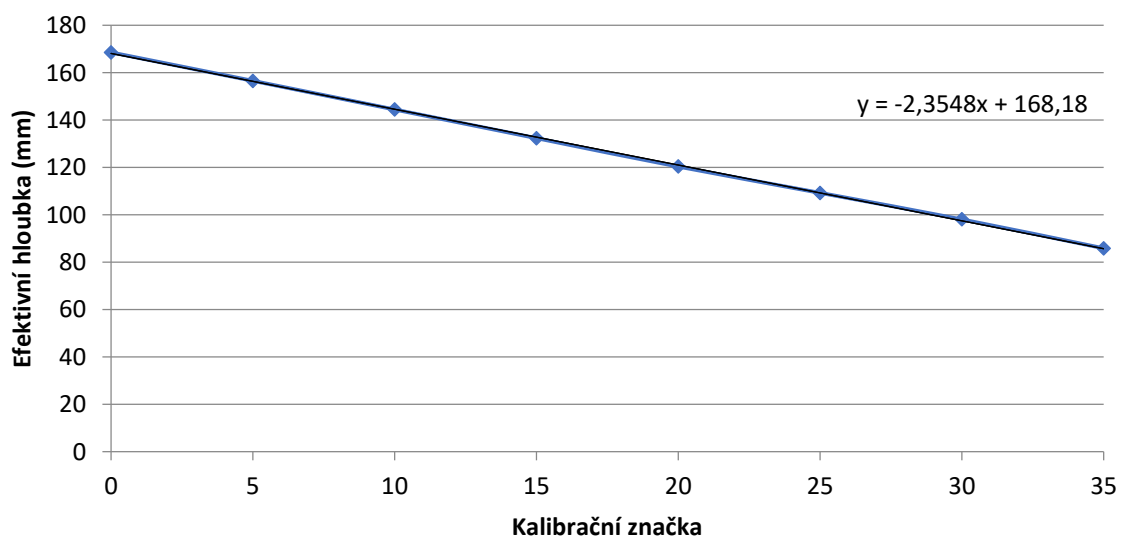
Před započítáním hustoměrné zkoušky bylo nutné dle normy ČSN EN ISO 17892-4 provést kalibraci hustoměru (Graf 1).

Tato kalibrace (Obrázek 19) byla provedena následujícím způsobem. Na stupnici odměrného válce se změřila vzdálenost od značky 100 ml po značku 1 000 ml (L). Na hrdle hustoměru se změřila vzdálenost nejnižší kalibrační značky ke každé jiné hlavní kalibrační značce (d_i). Dále se stanovila vzdálenost od krku baňky k nejnižší kalibrační značce (N) a vzdálenost od krku k hrotu baňky (h). Vzdálenost H odpovídající jakémukoliv čtení Rh na stupnici hustoměru byla vypočtena jako součet naměřených vzdáleností. Efektivní hloubka hustoměru (Hr) byla vypočtena pomocí vzorce:

$$Hr = H + 0,5 \left(h - \frac{vh}{900} * L \right) \quad (13)$$



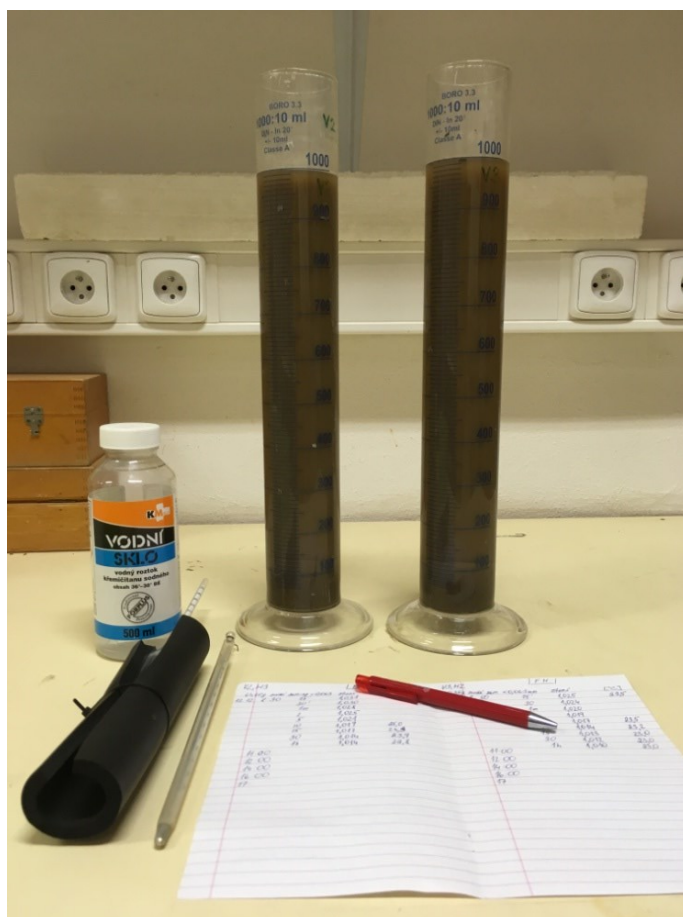
Obrázek 19: Schéma kalibrace hustoměru [1]



Graf 1: Kalibrační křivka hustoměru

Hustoměrná zkouška byla provedena dvakrát pro každý ze tří vzorků. Vzorek zeminy byl v odměrném válci promíchán s disperzním činidlem (vodní sklo), aby došlo k úplnému rozptýlení zrn zeminy. Suspenze v odměrném válci se doplnila destilovanou vodou do 1 litru a nechala se odstát. Poté se řádně promíchala tak, aby došlo k dokonalému rozptýlení zrn,

a do odměrného válce se ponořil hustoměr a zároveň se spustil čas na připravených stopkách. Současně se měřila teplota suspenze. Údaje z hustoměru a teploměru se podle normy zaznamenávaly po 15', 30', 1, 2, 5, 10, 15, 30 min., 1, 2, 4, 8, 16, 24 hodinách. Tyto hodnoty se poté opravily podle opravného čtení na menisku a kalibrace hustoměru (Obrázek 20).



Obrázek 20: Hustoměrná zkouška (zdroj autor)

Po ukončení a vyhodnocení sítové i hustoměrné zkoušky byla vykreslena křivka zrnitosti, jejíž každý bod udává procentuální zastoupení všech zrn menších než daný průměr.

5.3 Stanovení vlhkosti zeminy v přirozeném uložení

Dle ČSN EN ISO 17892-1 (duben 2015).

Předpokládáme, že zemina má v přirozeném stavu vždy určitou vlhkost. Vlhkost zeminy je určena množstvím vody v pórech mezi zrny zeminy, které lze odstranit sušením při teplotě 110 °C po dobu 12 až 24 hodin, vyjádřené jako procento hmotnosti suché zeminy. [10]

Byly odebrány dva vzorky z každé zeminy a zaznamenána jejich hmotnost. Tyto vzorky se nechaly vysušit 24 hodin a následně byla zvážena hmotnost vzorků po vysušení.

Poté se stanovila pomocí vzorce vlhkost zeminy na obou vzorcích zvlášť a nakonec se obě hodnoty zprůměrovaly.

Vlhkost vyjadřujeme v procentech a stanovíme ji podle následujícího vzorce:

$$w = \frac{m - m_d}{m_d} * 100 [\%] \quad (14)$$

kde m je hmotnost vzorku zeminy před vysušením a m_d je hmotnost vysušeného vzorku.

5.4 Stanovení měrné hmotnosti pevných částic

DLE ČSN EN ISO 17892-3 (kveten 2016).

Měrná hmotnost pevných částic (obrázek 21) byla stanovena pomocí pyknometrické zkoušky. Veškeré hodnoty z vážení v této zkoušce je nutné provádět na váze s přesností 0,001 g.



Obrázek 21: Pyknometrická zkouška, temperování (zdroj autor)

Měrná hmotnost pevných částic byla stanovena pomocí vzorce:

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{(m_w - m_1) - (m_3 - m_2)} * \rho_w \quad (15)$$

kde m_1 je hmotnost pyknometru, m_2 je hmotnost pyknometru se vzorkem, m_3 je hmotnost pyknometru se vzorkem a vodou po vaření, m_w je hmotnost pyknometru naplněného destilovanou vodou a ρ_w je objemová hmotnost vody.

5.5 Stanovení vlhkosti na mezi tekutosti a plasticity

Dle ČSN EN ISO/TS 17892-12. (listopad 2018).

Vlhkost na mezi tekutosti byla stanovena kuželovou zkouškou, vlhkost na mezi plasticity válečkovou zkouškou. Popisy těchto metod se nachází v kapitole 4.1 a 4.2.

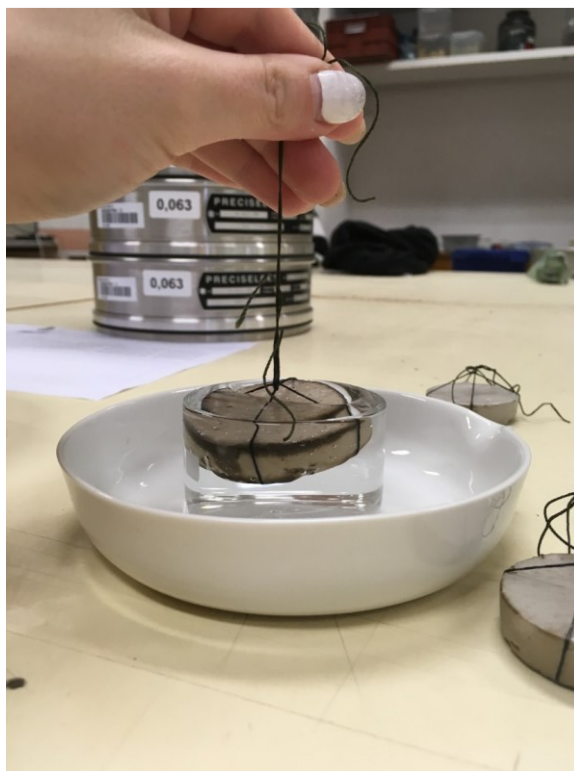
5. 6 Stanovení vlhkosti na mezi smrštění

„Na motivy“ BS 1377-2:1990 (Postup zkoušky byl upraven.)

Ze zeminy byl odebrán vzorek o hmotnosti 50 g s velikostí zrn do 425 μm . Takto připravená zemina byla smíchána s destilovanou vodou tak, aby vznikla snadno zpracovatelná pasta s vlhkostí o něco nižší, než je vlhkost na mezi tekutosti. Takto připravená pasta se vkládala do misek tak, aby se v zemině nevytvářely vzduchové kapsy. Pro zachycení všech vzduchových mezer bylo zlehka poklepáváno miskou o pevnou podložku. Zbylá zemina přesahující přes okraj byla odstraněna a povrch zeminy byl zarovnan s povrchem misky. V této fázi byla naplněná miska zvážena s přesností na 0,01 g. Takto připravená zemina byla vysušena v sušičce při konstantní teplotě 105 °C až 110 °C do té doby, dokud se hmotnost zeminy v misce neustálila. Vysušená zemina v podobě válečku byla opět zvážena s přesností na 0,01 g. Hmotnost a objem v průběhu vysušování nebyla monitorována. Připravený vysušený váleček zeminy byl ponořen do parafínu, který vytvořil ochrannou vrstvu proti nasáknutí vody zeminou. Objem válečku byl stanoven ponořením do vody (Obrázek 22). Dále byla stanovena hmotnost mokré zeminy m_l , hmotnost suché zeminy m_d a vlhkost w_l . Nakonec byla vypočtena vlhkost na mezi smrštění w_s z rovnice:

$$w_s = w_l - \left(\frac{V_l - V_d}{m_d} \right) * 100 [\%], \quad (16)$$

kde V_l je počáteční objem vzorku a V_d je objem suchého vzorku zeminy.



Obrázek 22: Stanovení vlhkosti na mezi smrštění (zdroj autor)

5. 7 Stanovení křivky smrštění

Balónková metoda [10, 19]

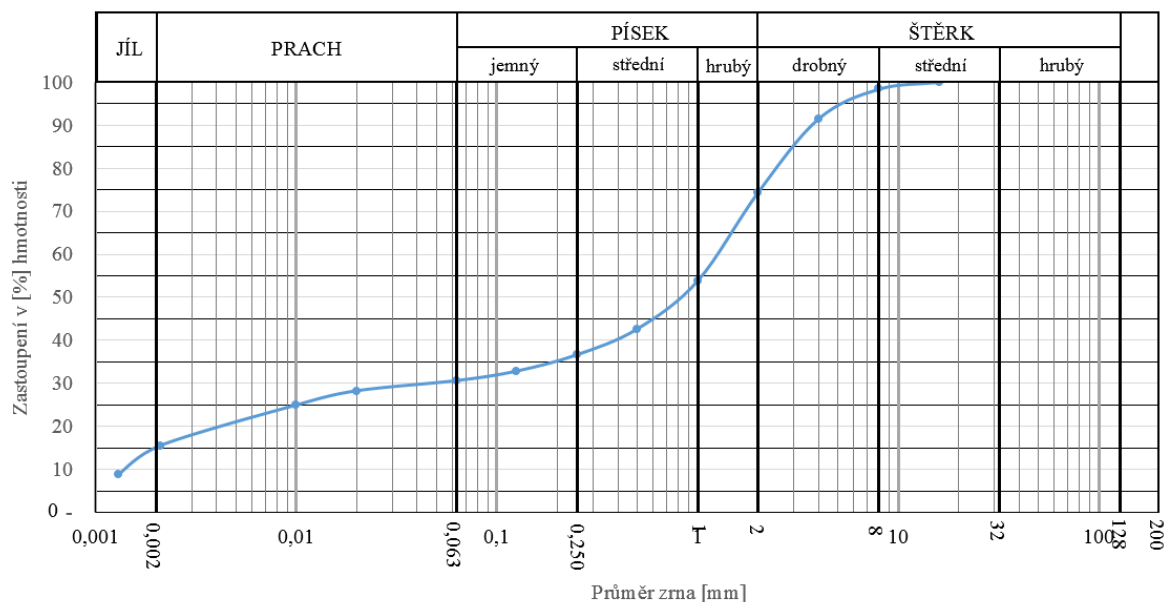
Ze zeminové pasty o vlhkosti na mezi tekutosti se odebral vzorek o velikosti 30 až 50 cm³, který se následně vpravil do balónku, tak aby v zemině nevznikly vzduchové bubliny. Balonek se zeminou se utěsnil pomocí špuntů, do kterého vedly hadičky na přívod a odvod vzduchu. Hadička na přívod vzduchu byla propojena s malým kompresorem, který zajistil cirkulaci vzduchu a tím postupné vysušování vzorku (Obrázek 23). Celá aparatura byla umístěna nad váhou, aby se minimalizovala manipulace se vzorkem a váhou. V první fázi se provedlo počáteční měření hmotnosti vzorku a objemu vody v kádince po rysku. Objem vzorku v balónku byl stanoven jeho ponořením do kádinky s vodou známého objemu následujícím způsobem: vzorek se ponořil po ukazatel do kádinky s vodou, pomocí podtlaku se z balónku odsál vzduch, hadičky se utěsnily a kádinka se doplnila vodou po rysku. Poté byl balónek vyňat a odečetl se objem vody. Čím více se zemina smršťovala, tím více rostl objem vody v kádince. V pravidelných intervalech se poté provádělo odečítání hmotnosti i objemu vzorku. Tato měření hmotnosti a objemu vzorku se prováděla až do chvíle, kdy se nám hmotnost vzorku ustálila. V této fázi se vyňal vzorek zeminy z balónku a nechal se dosušit v sušičce.



Obrázek 23: Balónková metoda (zdroj autor)

5.8 Vyhodnocení zkoušek na vzorku M

Na základě zrnitostního rozboru (Obrázek 24) a hodnot konzistenčních mezí byl vzorek klasifikován dle ČSN 73 6133: SC (Písek jílovitý)



Obrázek 24: Křivka zrnitosti vzorku M

Procentuální zastoupení zrnitostních frakcí:

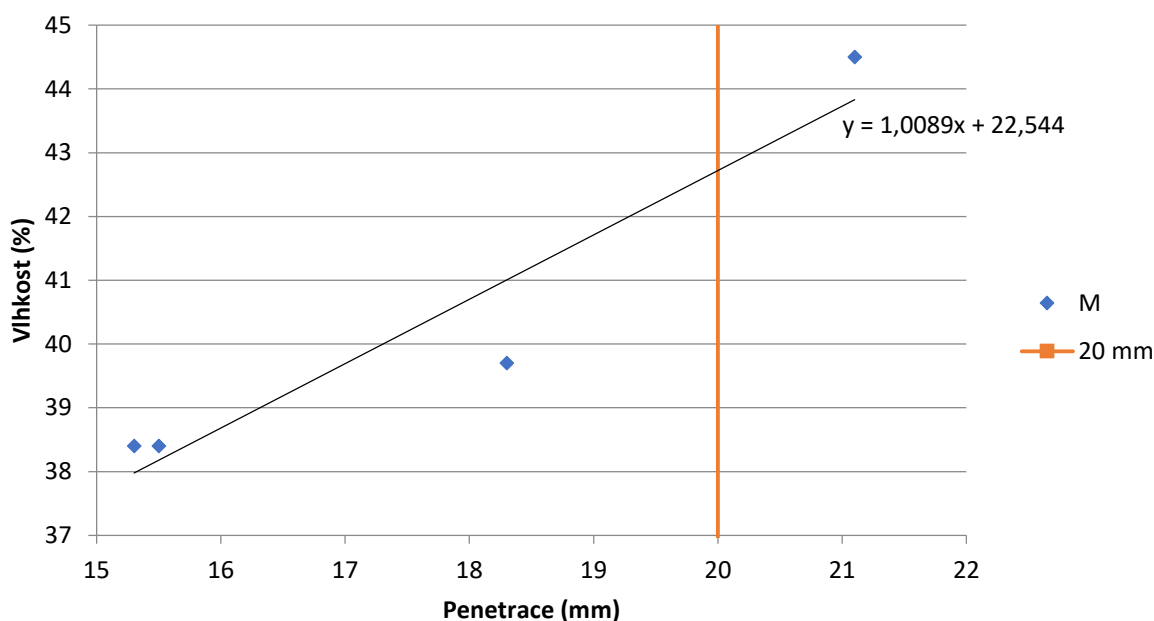
- Štěrkovitá frakce 2 mm ÷ 63 mm → 25,60 %
- Písčítá frakce 0,063 mm ÷ 2 mm → 43,82 %
- Jemnozrnná frakce < 0,063 mm → 30,58 %
- Hlinitá frakce 0,002 – 0,063 mm → 15,13 %
- Jílovité částice < 0,002 mm → 15,45 %

U vzorku M byla pomocí pyknometrické zkoušky stanovena zdánlivá hustota pevných částic 2,597 g/cm³.

Vlhkost na mezi tekutosti byla stanovena pomocí kuželové zkoušky (80g/30°). Výsledky jsou uvedeny v Graf 2 a v Tabulka 9. Přesto, že bylo naměřeno více hodnot penetrací, dle normy je možné považovat za platné pouze výsledky s penetrací v rozmezí 15,0 až 25,0 mm.

Penetrace kužele (mm)	Vlhkost (%)
15,3	38,42
15,5	38,45
18,3	39,71
21,1	44,56
$w_L = 1,0089 \cdot 20 + 22,544 = 42,72 \%$	

Tabulka 9: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku M



Graf 2: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku M, $w_L = 42,72 \%$

Po vyhodnocení kuželové zkoušky byla stanovena vlhkost na mezi plasticity o hodnotě 11,25 %. Původní vlhkost vzorku byla 25,5 % (průměrná hodnota z hodnot 27,1 % a 23,9 %.)

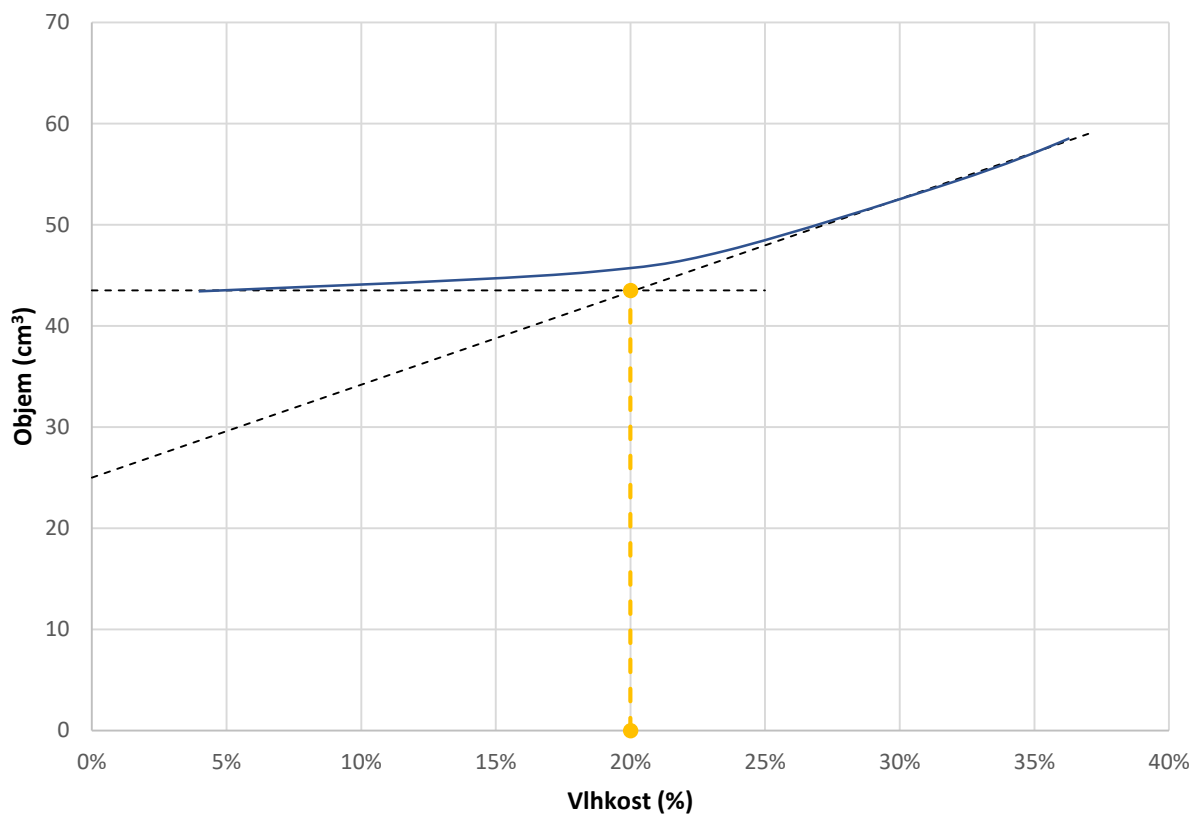
Dále byl určen index plasticity $I_p = 42,722 - 11,25 = 31,472 \%$ a index konzistence $I_c = 0,547$. Konzistenční stav zeminy je tuhý (dle ČSN 73 1005).

Nakonec byla vyhodnocena vlhkost na mezi smrštění pomocí normy BS 1377 - 2 na hodnotu 16,65 %. Tato hodnota byla stanovena jako průměrná hodnota z hodnot 16,52 %, 15,70 % a 15,29 % (Tabulka 10).

	Měření	Měření	Měření
Hmotnost zeminy (g)	35,58	33,96	35,86
Hmotnost suché zeminy (g)	24,82	23,76	25,05
Vlhkost (%)	43,35	42,93	43,15
Objem kádinky (cm ³)	20,41	19,45	21,26
Objem suché zeminy (cm ³)	13,75	12,98	14,28
w _s (%)	16,52	15,70	15,29

Tabulka 10: Vlhkost na mezi smrštění w_s, vzorek M

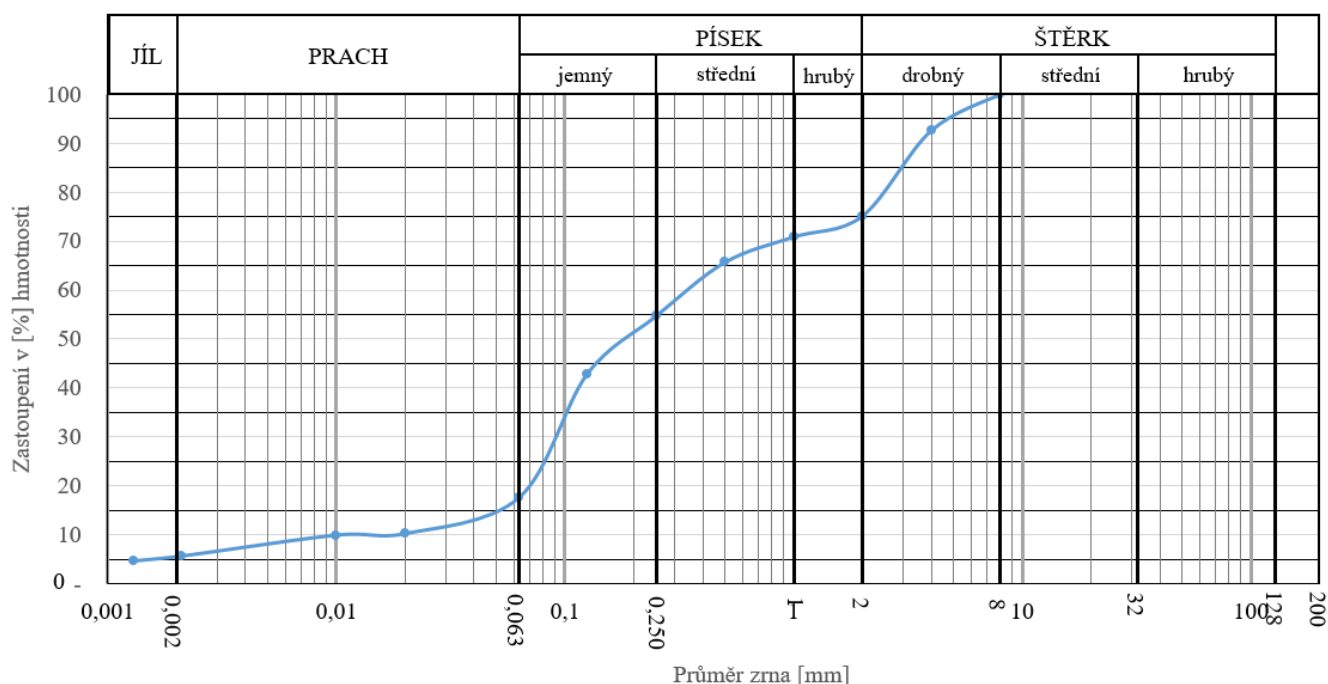
Vlhkost na mezi smrštění byla stanovena také pomocí balónkové metody a její hodnota je rovna 19,99 %. Rovněž byla touto metodou stanovena křivka smrštění, kterou znázorňuje Graf 3.



Graf 3: Křivka smrštění vzorku M

5.9 Vyhodnocení zkoušek na vzorku FM

Na základě zrnitostního rozboru (Obrázek 25) a hodnot konzistenčních mezí byl vzorek klasifikován dle ČSN 73 6133: SC (Písek jílovitý)



Obrázek 25: Křivka zrnitosti vzorku FM

Procentuální zastoupení frakcí:

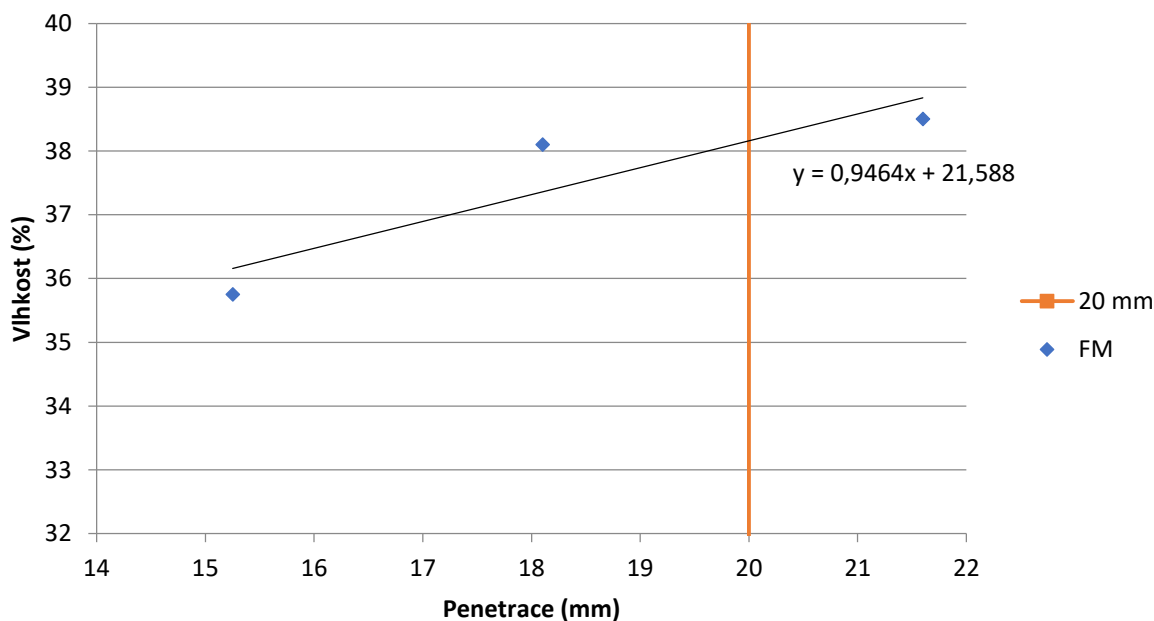
- Štěrkovitá frakce 2 mm ÷ 63 mm → 24,87 %
- Písčítá frakce 0,063 mm ÷ 2 mm → 57,58 %
- Jemnozrnná frakce < 0,063 mm → 17,55 %
- Hlinitá frakce 0,002 – 0,063 mm → 11,94 %
- Jílovité částice < 0,002 mm → 5,61 %

U vzorku FM byla pomocí pyknometrické zkoušky stanovena zdánlivá hustota pevných částic 2,665 g/cm³.

Vlhkost na mezi tekutosti byla stanovena pomocí kuželové zkoušky (80g/30°). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 11 a znázorněny v Graf 4. Přesto, že bylo naměřeno více hodnot penetrace, dle normy je možné považovat za platné výsledky s penetrací mezi 15,0 až 25,0 mm.

Penetrace kužele (mm)	Vlhkost (%)
15,25	35,8
18,1	38,1
21,6	38,5
$wL = 0,9464 \cdot 20 + 21,588 = 40,52 \%$	

Tabulka 11: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku FM



Graf 4: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku FM, $WL = 40,52 \%$

Po vyhodnocení kuželové zkoušky byla stanovena vlhkost na mezi plasticity o hodnotě 10,53 %. Původní vlhkost vzorku byla 21,40 % (průměrná hodnota z hodnot 20,85 % a 21,95 %).

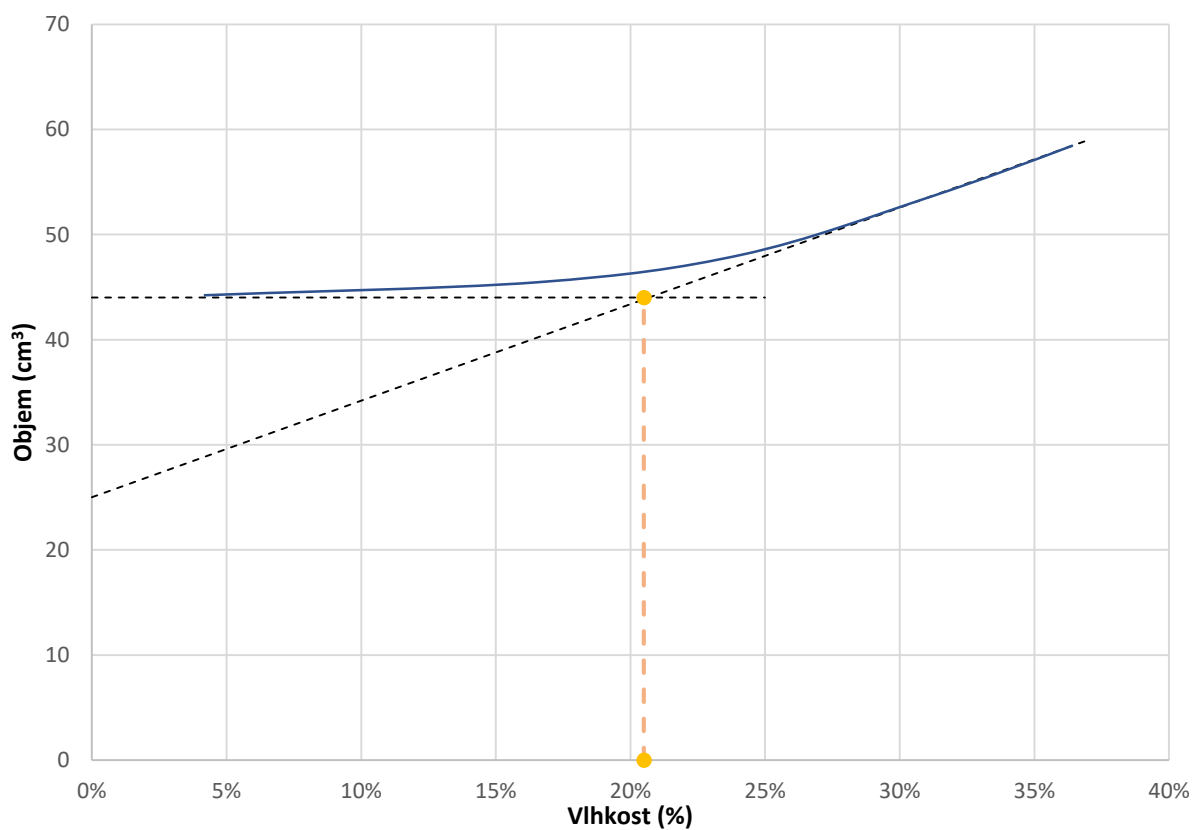
Dále byl určen index plasticity $I_p = 40,52 - 10,53 = 29,985 \%$ a index konzistence $I_c = 0,638$. Konzistenční stav zeminy je tuhý (dle ČSN 73 1005).

Nakonec byla vyhodnocena vlhkost na mezi smrštění na hodnotu 19,60 %. Tato hodnota byla stanovena jako průměrná hodnota z hodnot 16,05 %, 22,47 % a 26,70 % (Tabulka 12).

	Měření	Měření	Měření
Hmotnost zeminy (g)	35,89	35,78	35,49
Hmotnost suché zeminy (g)	25,47	25,49	25,22
Vlhkost (%)	40,9	40,4	40,7
Objem kádinky (cm ³)	20,41	20,15	21,26
Objem suché zeminy (cm ³)	14,08	15,58	17,73
w _s (%)	16,05	22,47	26,70

Tabulka 12: Vlhkost na mezi smrštění w_s, vzorek FM

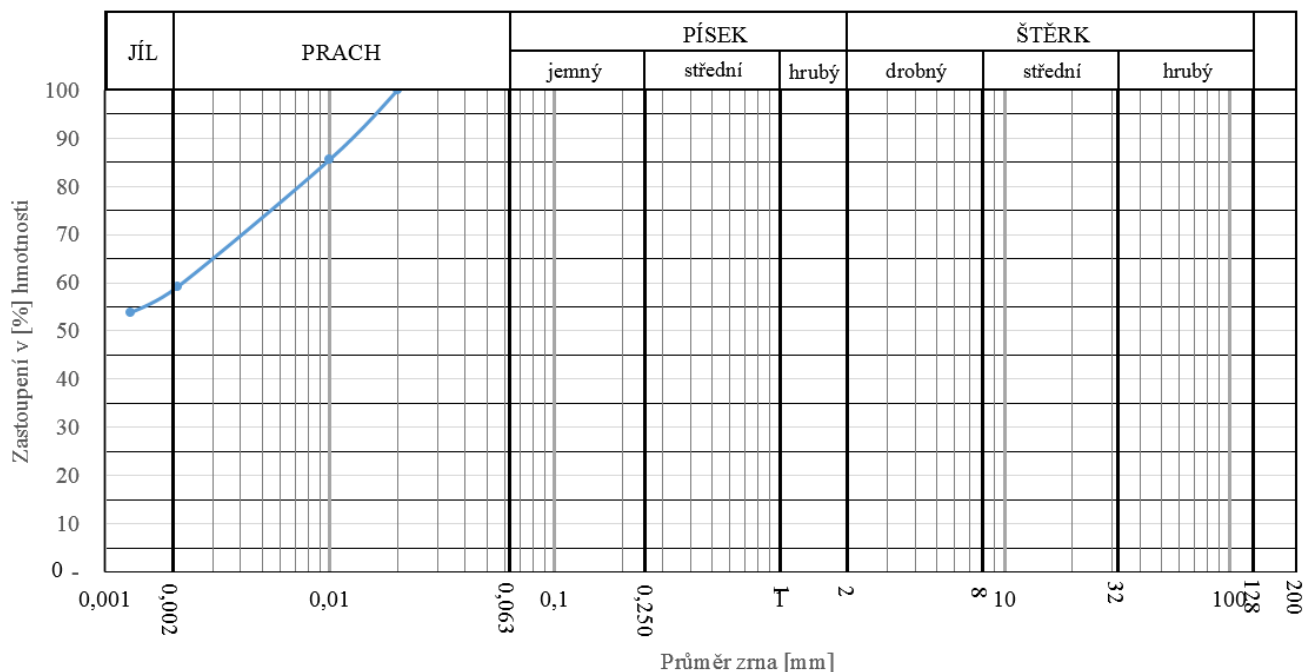
Vlhkost na mezi smrštění byla stanovena také pomocí balónkové metody a její hodnota je rovna 20,55 %. Rovněž byla touto metodou stanovena křivka smrštění, kterou znázorňuje Graf 5.



Graf 5: Křivka smrštění vzorku FM

5.10 Vyhodnocení zkoušek na vzorku SČ

Na základě zrnitostního rozboru (Obrázek 2626) a hodnot konzistenčních mezí byl vzorek klasifikován dle ČSN 73 6133: Jíl s vysokou plasticitou (CH)



Obrázek 26: Křivka zrnitosti vzorku SČ

Procentuální zastoupení frakcí:

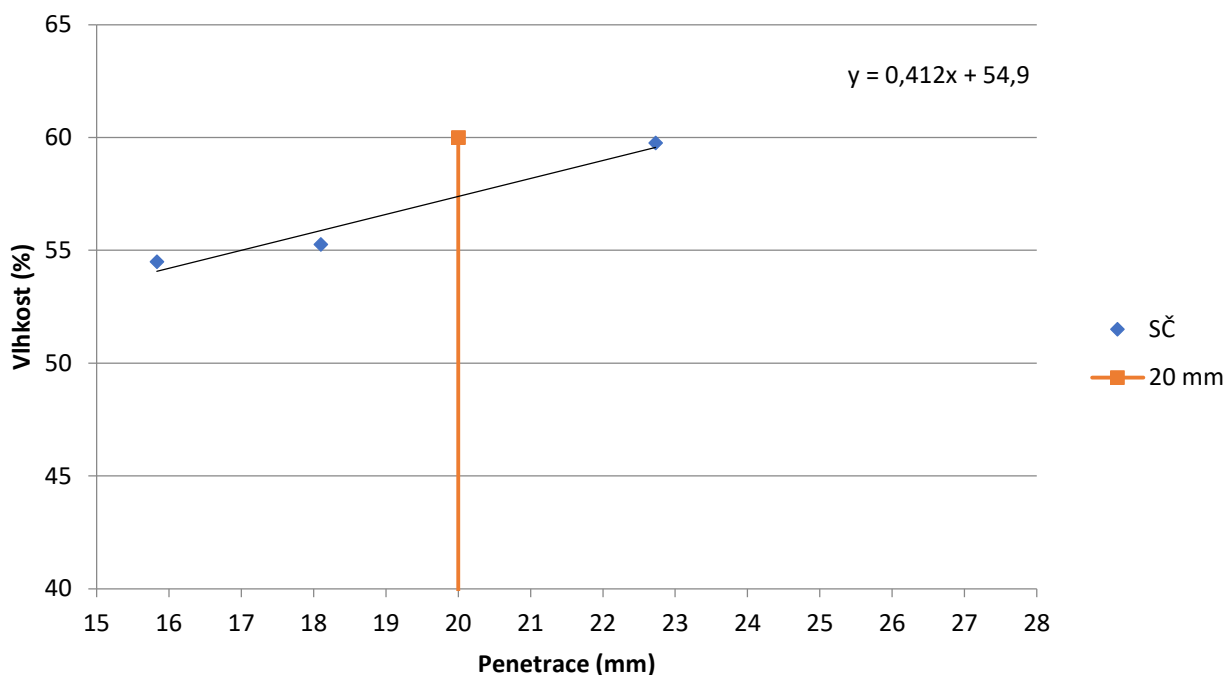
- Štěrkovitá frakce 2 mm ÷ 63 mm → 0 %
- Písčítá frakce 0,063 mm ÷ 2 mm → 0 %
- Jemnozrnná frakce < 0,063 mm → 100,0 %
- Hlinitá frakce 0,002 – 0,063 mm → 40,95 %
- Jílovité částice < 0,002 mm → 59,05 %

U vzorku M byla pomocí pyknometrické zkoušky stanovena zdánlivá hustota pevných částic 2,636 g/cm³.

Vlhkost na mezi tekutosti byla stanovena pomocí kuželové zkoušky (80g/30°). Výsledky jsou uvedeny v Graf 6 a v Tabulce 13. Přesto, že bylo naměřeno více hodnot penetrace, dle normy je možné považovat za platné pouze výsledky s penetrací mezi 15,0 až 25,0 mm.

Penetrace kužele (mm)	Vlhkost (%)
15,83	54,49
18,1	55,26
22,73	59,76
$w_L = 0,412 \cdot 20 + 54,9 = 63,14 \%$	

Tabulka 13: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku SČ



Graf 6: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku SČ, $w_L = 63,14 \%$

Po vyhodnocení kuželové zkoušky byla stanovena vlhkost na mezi plasticity o hodnotě 28,83 %. Původní vlhkost vzorku byla 3,42 %.

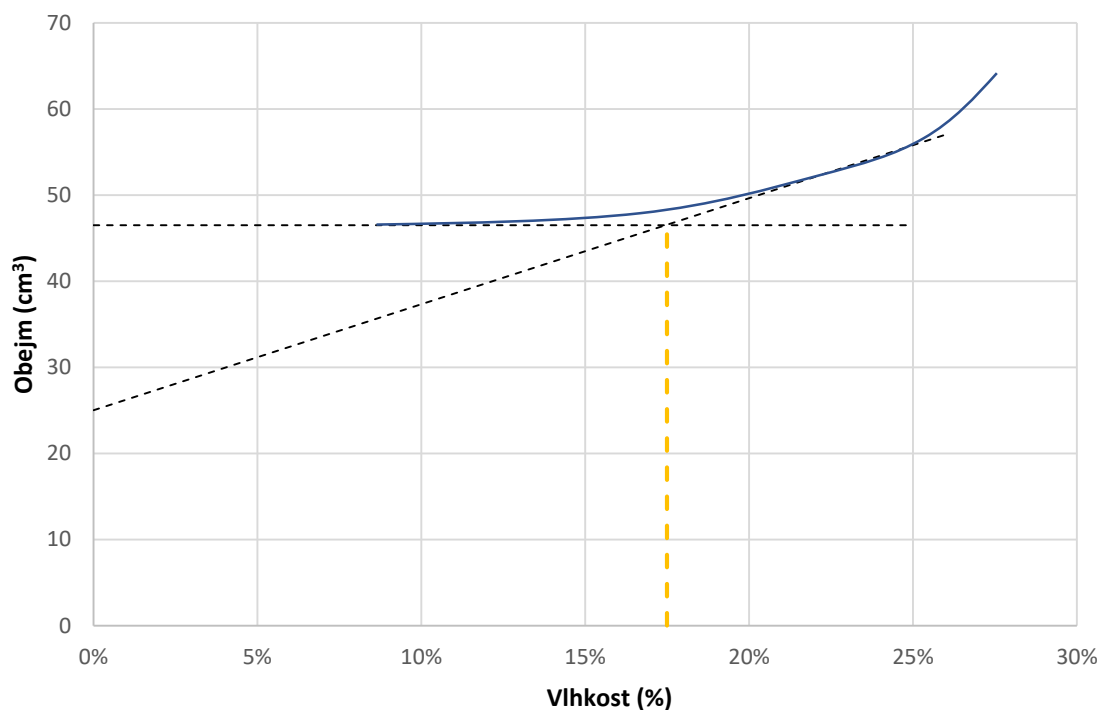
Dále byl určen index plasticity $I_p = 34,31 \%$ a index konzistence $I_c = 1,74$. Konzistenční stav zeminy je pevný (dle ČSN 73 1005).

Nakonec byla vyhodnocena vlhkost na mezi smrštění na hodnotu 16,23 %. Tato hodnota byla stanovena jako průměrná hodnota z hodnot 15,82 %, 16,51 % a 20,60 % (Tabulka 14).

	Měření	Měření	Měření
Hmotnost zeminy (g)	32,46	33,8	32,96
Hmotnost Suché zeminy (g)	19,91	20,78	20,19
Vlhkost (%)	63,04	62,65	63,25
Objem kádinky (cm ³)	20,41	20,15	21,26
Objem suché zeminy (cm ³)	11,01	10,56	12,65
w _s (%)	15,82	16,51	20,60

Tabulka 14: Vlhkost na mezi smrštění w_s, vzorek SČ

Byla stanovena vlhkost na mezi smrštění pomocí balónkové metody s hodnotou 17,50 %. Rovněž byla touto metodou stanovena křivka smrštění, kterou znázorňuje Graf 7.



Graf 7: Křivka smrštění vzorku SČ

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši možností stanovení vlhkosti na mezi smrštění w_s , a pak také tuto vlhkost stanovit na několika vzorcích v laboratorních podmínkách. Vlhkost na mezi smrštění byla stanovena pomocí dvou metod.

První metoda vychází z britské normy BS 1377-2: *Methods of test for Soils for civil engineering purposes – Part 2: Classification tests*. Norma předepisuje během vysušování průběžné měření objemu vzorku jeho ponořením do rtuti, jejíž použití však s sebou nese řadu omezení. V této práci byla zemina ponořena do parafínu, aby bylo možné stanovit objem. Tento postup je však možný pouze u stanovení objemu na konci zkoušky (tedy po jejím vysušení), nikoliv v průběhu vysušování. Průběžná měření během vysušování proto prováděna nebyla. Postup zkoušky se tedy výrazně zjednodušil, protože spočíval pouze v měření konečné hmotnosti a objemu vzorku zeminy.

Druhý způsob stanovení w_s , pojmenovaný „Balónková metoda“, spočíval v monitorování hmotnosti a objemu vzorku zeminy v balónku ponořením do vody během pozvolného vysušování, čímž byl eliminována hlavní nevýhoda zkoušky dle BS 1377-2, a to manipulace se rtutí. Výsledkem byla nejen samotná hodnota vlhkosti na mezi smrštění, ale i křivka smrštění, která znázorňuje závislost objemu vzorku zeminy na jeho vlhkosti. Samotná zkouška však byla poměrně náročná na přesnost měření a čas (jedna zkouška trvala zpravidla 1 týden). V tomto směru bylo stanovení meze smrštění na motivy BS 1377-2 výrazně jednodušší.

Zkoušeny byly tři vzorky zeminy označené písmeny M (vzorek z Metylovic), FM (Frýdek-Místek) a SČ (Severní Čechy).

Vzorky byly podrobeny zrnitostnímu rozboru, pyknometrické zkoušce pro stanovení měrné hmotnosti ρ_s , kuželové zkoušce pro určení vlhkosti na mezi tekutosti w_L a zkoušce válečkové pro zjištění vlhkosti na mezi plasticity w_P . Vzorky zemin byly klasifikovány dle ČSN 73 6133, resp. dle ČSN 73 1005. Výsledky zrnitostního rozboru a pyknometrické zkoušky shrnuje Tabulka 15. Vlhkost vzorků zemin v přirozeném uložení, vlhkost na mezi plasticity w_P , vlhkost na mezi tekutosti w_L , index konzistence, index plasticity a konzistenční stav zeminy rekapituluje Tabulka 16.

Zemina	Jílovitá frakce (%)	Jemnozrnná frakce (%)	Písčitá frakce (%)	Štěrkovitá frakce (%)	Klasifikace dle ČSN 73 6133	ρ_s (g/cm³)
M	15,45	30,58	43,82	25,60	Písek jílovitý	2,597
FM	5,60	17,55	57,58	24,87	Písek jílovitý	2,665
SČ	59,05	100	0	0	Jíl s vysokou plasticitou	2,636

Tabulka 15: Výsledky zrnitostního rozboru a pyknometrické zkoušky

Zemina	w (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P (%)	I_c	Konzistenční stav dle CSN 73 1005
M	25,5	42,72	11,25	31,47	0,547	Tuhý
FM	21,4	40,52	10,54	29,98	0,638	Tuhý
SČ	3,4	63,14	28,83	34,31	1,74	Tvrký

Tabulka 16: Výsledky Atterbergových zkoušek

Srovnání výsledných hodnot vlhkostí na mezi smrštění u všech tří vzorků je uvedeno v Tabulce 17. Poměr mezi výsledkem vlhkosti na mezi smrštění stanovené metodou inspirovanou normou BS 1377-2 a balónkovou metodou je u všech tří vzorků menší než jedna. Hodnoty w_s stanovené balónkovou metodou jsou tedy ve všech případech vyšší, což se dalo očekávat, protože metoda inspirovaná postupem v BS 1377-2 spočívala v jediném měření, a to až po vysušení v sušičce při 110 °C.

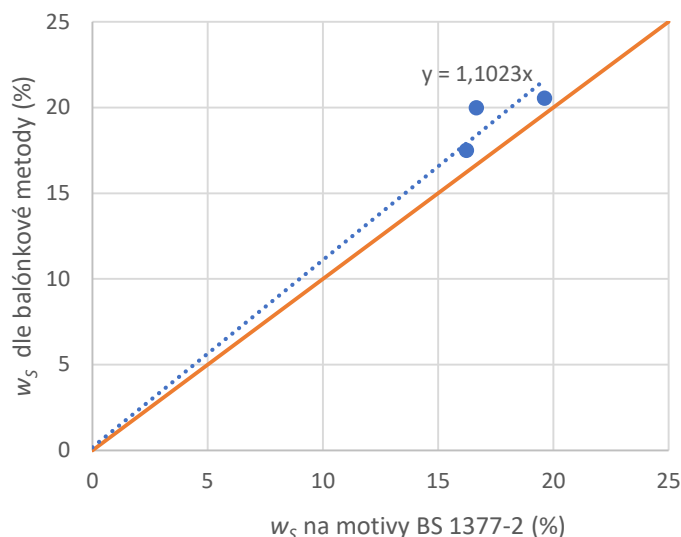
Zemina	w_{s, parafín} “na motivy” BS 1377-2 (%)	w_s dle BM (%)	BS / BM (-)
M	16,65	19,99	0,83
FM	19,61	20,55	0,95
SČ	16,23	17,50	0,93

Tabulka 17: Výsledky vlhkosti na mezi smrštění

Vynesáním výsledných hodnot do grafu s vlhkostmi na mezi smrštění stanovené na motivy BS 1377-2 na vodorovné ose a s vlhkostmi na mezi smrštění stanovené balónkovou metodou na svislé ose získáme vzájemnou závislost charakterizovanou vztahem:

$$w_s = 1,1023 * w_{s, parafín}$$

Na základě této závislosti je možné s pomocí časově nenáročného a na provedení jednoduché zkoušky inspirované BS 1377-2 stanovit vlhkost na mezi smrštění, kterou bychom získali balónkovou metodou. Pro zpřesnění a ověření pravdivosti tohoto vztahu je však zapotřebí provést měření na dalších vzorcích zeminy.



Graf 8: Vztah meze smrštění stanovené balónkovou metodou a metodou inspirovanou dle BS 1377-2 ponořením vzorku do parafínu

S pomocí konzistenčních mezí a zrnitostní analýzy byla nakonec stanovena náchylnost zkoušených zemin k smrštění a bobtnání pomocí potenciálu smrštění a potenciálu bobtnání (Tabulka 18).

Zemina	Potenciál smrštění dle Jonese [22]	Potenciál bobtnání dle Ramana [29]
M	Vysoký	Střední
FM	Vysoký	Střední
SČ	vysoký	Vysoký

Tabulka 18: Potenciál smrštění a bobtnání vzorků M, FM, SČ

Poděkování

Mé poděkování patří Ing. Barbaře Luňáčkové, Ph.D. za odborné vedení práce a trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovala.

V Ostravě, dne 2. května 2019

Markéta Borská

7. Seznam literatury

- [1] ŠIMEK, Jiří. Mechanika zemin. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00428-4.
- [2] KULHAWY, F.H. a P.W. MAYNE. Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design. 1. Ithaca, New York: Cornell University, Geotechnical Engineering Group, 1990.
- [3] ONYEJEKWE, Site, Xin KANG a Louis GE. Assessment of empirical equations for the compression index of fine-grained soils in Missouri. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2015, 74(3), 705-716. DOI: 10.1007/s10064-014-0659-8. ISSN 1435-9529. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10064-014-0659-8>
- [4] HEAD, K. Manual of soil laboratory testing: Volume 1 - Soil Classification and Compaction Tests. Third edition. Dunbeath: Whittles Publishing, 2006. ISBN 978-1-904445-36-4.
- [5] ROZSYPAL, Alexandr. Kontrolní sledování a rizika v geotechnice. Bratislava: Jaga, 2001. ISBN 80-889-0544-3.
- [6] PETRÁNEK, Jan, Jiří BŘEZINA, Eva BŘÍZOVÁ, Jan CHÁB, Jan LOUN a Přemysl ZELENKA. Encyklopedie geologie. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.
- [7] VANÍČEK, Ivan. Mechanika zemin. Vyd. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1437-1.
- [8] WEIGLOVÁ, Kamila, Věra GLISNÍKOVÁ a Jan MASOPUST. Mechanika zemin a zakládání staveb: pro kombinované studium. Brno: CERM, 2003. ISBN 80-214-2376-5.
- [9] KOŘÍNEK, Robert. Mechanika hornin a zemin. In: Fakulta stavební [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://fast10.vsb.cz/korinek/mhz.html>
- [10] BURLAND, J. a Tim CHAPMAN. ICE manual of geotechnical engineering. London: ICE, 2012. ISBN 978-0-7277-5709-8.
- [11] ATKINSON, John. The mechanics of soils and foundations. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007. ISBN 978-041-5362-566.
- [12] TERZAGHI, Karel a Ralph PECK. Soil mechanics in engineering practice. 2nd ed. New York: John Wiley, 1967. Wiley international edition. ISBN 978-1446510391.

- [13] LAMBE, T. a Robert WHITMAN. Soil mechanics. New York: Wiley, 1969. ISBN 04- 715-1192-7.
- [14] MANDAL, J.N. a P. GUPTA. Stability of geocell-reinforced soil. Construction and Building Materials. 1994, 8(1), 55-62. DOI: 10.1016/0950-0618(94)90009-4. ISSN 09500618. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0950061894900094>
- [15] Linear Shrinkage Mould. UTEST: Material testing Equipment [online]. Ankara, b.r. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.utest.com.tr/en/23130/Linear-Shrinkage-Mould>
- [16] BENSALLAM, S. Shrinkage Curve: Experimental Study and Modelling. International Journal of Engineering. 2012, 25(3), 203-210. DOI: 10.5829/idosi.ije.2012.25.03a.02. ISSN 10252495. Dostupné také z: <http://www.ije.ir/Vol25/No3/A/2.pdf>
- [17] BRAUDEAU, Erik, Jean-Pierre FRANGI a Rabi MOHTAR. Characterizing Nonrigid Aggregated Soil–Water Medium Using its Shrinkage Curve. Soil Science Society of America Journal. 2004, 68(2), 359-370. DOI: 10.2136/sssaj2004.3590. ISSN 1435- 0661. Dostupné také z: <https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/68/2/359>
- [18] ŠINDELÁŘ, Jakub. Identifikace a řešení problematiku zemin náchylných k bobtnání - certifikovaná metodika. In: 34. mezinárodní konference Polní geotechnické metody 2018. Ústí nad Labem: AZ Consult, spol. s r.o., 2018, s. 121-130. ISSN 1213-1237.
- [19] BAŽANT, Zdeněk. Zakládání staveb. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1967. Řada stavební literatury.
- [20] LEGUT, Dana. Zakládání na objemově nestálých zeminách. Brno, 2013. Dizeertační práce. VUT Brno. Vedoucí práce Antonín Paseka.
- [21] KYCL, . Geohazardy - Katalog geologických rizik: Objemové změny (smršťování a bobtnání jílu). Česká geologická služba [online]. b.r. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/geohazardy/katalog/geohazard-32/>
- [22] JONES, L.D. a I.F. JEFFERSON. Expansive soils. ICE manual of geotechnical engineering: Volume 1 Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation. London, UK: ICE Publishing, 2012, s. 413-441. ISBN 978-0-7277-5707-4.

- [23] HAINES, William B. The volume-changes associated with variations of water content in soil. *The Journal of Agricultural Science*. 1923, 13(03), 296-310. DOI: 10.1017/S0021859600003580. ISSN 0021-8596.
- [24] BOIVIN, Pascal. Shrinkage and Swelling Phenomena in Soils. *Encyclopedia of Agrophysics*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, 2011-8-28, , 733-735. *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. DOI: 10.1007/978-90-481-3585-1_139. ISBN 978-90-481-3584-4.
- [25] Burland, John Chapman, Tim Skinner, Hilary Brown, Michael. (2012). *ICE Manual of Geotechnical Engineering, Volume 1 - Geotechnical Engineering Principles, Problematic Soils and Site Investigation - 33.5.3.3 National versus Regional Characteristics*. ICE Publishing
- [26] BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. Low-rise buildings on shrinkable clay soils. Bracknell, UK: Building Research Establishment, 1993. ISBN 978-0851253770.
- [27] YILMAZ, Işık. Indirect estimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*. 2006, 85(3-4), 295-301. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.02.005. ISSN 00137952.
- [28] Holtz, W.G., 1959. Expansive clays—properties and problems. *Journal of the Colorado School of Mines* 54 (4), 89–125.
- [29] Raman, V., 1967. Identifications of expansive soils from the plasticity index and the shrinkage index data. *The Indian Engineer* 11 (1), 17–22.
- [30] DAKSHANAMURTHY, V. a V. RAMAN. A simple method of identifying an expansive soil. *Soils and foundations*. 1973, 13(1), 97-104. DOI: 10.3208/sandf1972.13.97. ISSN 0385-1621.
- [31] TARIQ, ATA-UR-REHMAN a DEANNA S. DURNFORD. Soil volumetric shrinkage measurements. *Soil Science* [online]. 1993, **155**(5), 325-330 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1097/00010694-199305000-00003. ISSN 0038-075X.

8. Seznam použitých norem

ČSN 72 1019: *Laboratorní stanovení smršťování zemin*

ČSN 73 6133: *Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*

ČSN 73 1005: *Inženýrskogeologický průzkum*

ČSN EN ISO 14688-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování zemin – část 1: Pojmenování a popis*

ČSN EN ISO 14689-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zatřídování hornin – část 1: Pojmenování a popis*

ČSN EN ISO 17892-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – část 1: Stanovení vlhkosti*

ČSN EN ISO 17892-3: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – část 3: Stanovení zdánlivé hustoty pevných částic*

ČSN EN ISO 17892-4: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – část 4: Stanovení zrnitosti*

ČSN EN ISO 17892 – 12: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity*

BS 1377-2: *Methods of test for Soils for civil engineering purposes – part 2: Classification tests.*

9. Seznam obrázků

Obrázek 1: Jílovitá zemina v přirozeném stavu (zdroj autor)	10
Obrázek 2: Schéma partikulární povahy částečně saturované zeminy	12
Obrázek 3: Trojfázový systém zemin [9]	13
Obrázek 4: Konzistenční stavy a meze [9]	14
Obrázek 5: Casagrandeho přístroj (zdroj autor)	17
Obrázek 6: Kuželová zkouška (zdroj autor)	17
Obrázek 7: Stanovení meze plasticity (zdroj autor)	18
Obrázek 8: Forma pro stanovení lineárního smrštění (vnitřní délka 140 mm, vnitřní průměr 12,5 mm) [15]	21
Obrázek 9: Schéma balónkové metody [31]	22
Obrázek 10: Křivka smrštění [10]	22
Obrázek 11: Fáze křivky smrštění [16]	23
Obrázek 12: Mikrostrukturální vývoj zeminy [25]	24
Obrázek 13: Casagrandeho plasticitní diagram [30]	26
Obrázek 14: Porucha budovy vlivem smrštění [22]	27
Obrázek 15: Místo odběru vzorku M (zdroj autor)	30
Obrázek 16: Místo odběru vzorku FM (zdroj autor)	30
Obrázek 17: Místo odběru vzorku SČ	31
Obrázek 18: Normová síta pro síťovou zkoušku (zdroj autor)	33
Obrázek 19: Schéma kalibrace hustoměru [1]	34
Obrázek 20: Hustoměrná zkouška (zdroj autor)	35
Obrázek 21: Pyknometrická zkouška, temperování (zdroj autor)	36
Obrázek 22: Stanovení vlhkosti na mezi smrštění (zdroj autor)	38
Obrázek 23: Balónková metoda (zdroj autor)	39
Obrázek 24: Křivka zrnitosti vzorku M	40
Obrázek 25: Křivka zrnitosti vzorku FM	43
Obrázek 26: Křivka zrnitosti vzorku SČ	46

10. Seznam tabulek a grafů

Tabulka 1: Druhy konzistenčních stavů dle ČSN EN ISO 14688-1,2 (duben 2018) a dle Atkinsona [11]	15
Tabulka 2: Druhy konzistenčních stavů dle ČSN 73 1005 (listopad 2016)	15
Tabulka 3: Index plasticity (ČSN EN ISO 14688)	19
Tabulka 4: Hodnoty Atterbergových mezí pro jílové minerály [28]	19
Tabulka 5: Potenciál smrštění jílovitých zemin [22]	25
Tabulka 6: Potenciál smrštění dle Holtze [28]	25
Tabulka 7: Potenciál smrštění dle Ramana [29]	26
Tabulka 8: Třídy kvality vzorků zemin [7]	29
Tabulka 9: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku M	41
Tabulka 10: Vlhkost na mezi smrštění w_s , vzorek M	42
Tabulka 11: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku FM	44
Tabulka 12: Vlhkost na mezi smrštění w_s , vzorek FM	45
Tabulka 13: Výsledky kuželové zkoušky na vzorku SČ	47
Tabulka 14: Vlhkost na mezi smrštění w_s , vzorek SČ	48
Tabulka 15: Výsledky zrnitostního rozboru a pyknometrické zkoušky	50
Tabulka 16: Výsledky Atterbergových zkoušek	50
Tabulka 17: Výsledky vlhkosti na mezi smrštění	50
Tabulka 18: Potenciál smrštění a bobtnání vzorků M, FM, SČ	51
Graf 1: Kalibrační křivka hustoměru	34
Graf 2: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku M, $W_L = 42,72\%$	41
Graf 3: Křivka smrštění vzorku M	42
Graf 4: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku FM, $W_L = 40,52\%$	44
Graf 5: Křivka smrštění vzorku FM	45
Graf 6: Vyhodnocení kuželové zkoušky vzorku SČ, $w_L = 63,14\%$	47
Graf 7: Křivka smrštění vzorku SČ	48
Graf 8: Vztah meze smrštění stanovené balónkovou metodou a metodou inspirovanou dle BS 1377-2 ponořením vzorku do parafínu	51